

研究生力学丛书

Mechanics Series for Graduate Students

粘性流体力学 (第2版)

Viscous Fluid Mechanics (Second Edition)

章梓雄 董曾南 编著

清华大学出版社

研究生力学丛书

Mechanics Series for Graduate Students

粘性流体力学 (第2版)

Viscous Fluid Mechanics (Second Edition)

章梓雄 董曾南 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统讲述了以水为代表的不可压缩粘性流体力学的基本理论。全书共 12 章。前 5 章为粘性流体力学的基本理论与方程。第 6~8 章为紊流的基本理论与方程。第 9~12 章分别讲述各种典型的紊流流动,包括射流、尾流、圆管紊流、紊流平板边界层及明槽紊流等。附录为场论与张量基本运算知识。

本书可作为水利、水电、土木、环境、流洋、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的教材或教学参考书,也可作为有关专业教师、科研和工程技术人员参考用书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

粘性流体力学/章梓雄,董曾南编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2011.6

(研究生力学丛书)

ISBN 978-7-302-24736-4

I. ①粘… II. ①章… ②董… III. ①粘性流体—流体力学—研究生—教材
IV. ①O357

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 021432 号

责任编辑:石磊 洪英

责任校对:王淑云

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:170×230 印 张:23.5 字 数:407 千字

版 次:2011 年 6 月第 2 版 印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

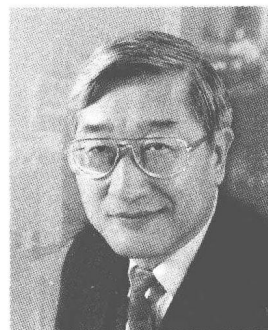
定 价:43.00 元

产品编号:036534-01

作者简介

章梓雄(Allen T. Chwang)

原籍浙江,1944年11月生于上海。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(California Institute of Technology)获博士学位。2003年当选中国科学院院士。曾任美国衣阿华大学教授,香港大学机械工程系主任、何东机械工程讲座教授、非线性力学中心主任,中山大学工学院院长;清华大学、西安交通大学、天津大学、大连理



工大学、四川大学、武汉大学客座教授,上海交通大学、复旦大学顾问教授,河海大学、北京航空航天大学、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、英国机械工程师学会、香港工程师学会资深会员;香港工程院院士。

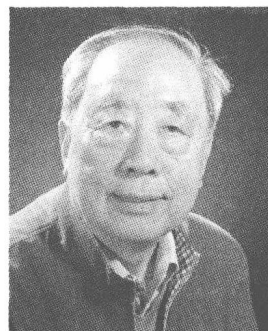
多年来从事粘性流动、波浪理论、非线性水波、两物体相互作用的水动力学问题、水下声学、海港设计等方面的研究工作。发表论文二百余篇,合编有《非粘性流体力学》、《粘性流体力学》。

2007年6月13日于香港去世。

作者简介

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(已退休)。曾任清华大学水利水电工程系主任、系学术委员会主任、博士生导师、清华大学学术委员会委员;中国科学院与清华大学合办工程力学研究班教师、班秘书;中国水利学会理事、名誉理事、水力专业委员会副主任;国家教委工科力学教学指导委员会委员;《中国科学》、《科学通报》、《水利学报》等期刊编委,《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,国际水利工程与研究协会(International Association of Hydraulic Engineering and Research, IAHR)理事、副主席。



多年来从事水力学、流体力学的教学和科学研究工作。曾为密云水库、三门峡水利枢纽工程、苏州河挡潮闸、三峡水利枢纽工程等多项重要水利工程进行水工模型试验研究。在水工水力学、明槽紊流、明流边界层等方面发表论文50篇。曾获国家教委科技进步奖二等奖3项、三等奖1项,北京市普通高校优秀教学成果奖一等奖1项;1993年被评为“北京市优秀教师”。主编《水力学》上册,由高等教育出版社出版;合编《非粘性流体力学》、《粘性流体力学》,由清华大学出版社出版。

再版前言

本书第1版自1998年出版以来,得到了与流体力学相关的工程专业的国内外华人读者的欢迎。2000年经教育部审定通过,推荐为“研究生教学用书”。广泛用作国内各高等学校博士生入学考试的指定参考书。12年来连续印刷五次,发行8500册。

2009年10月,清华大学出版社原总编辑张兆祺教授向我提出希望这本书能够修订再版。张教授也是流体力学方面的专家,很感激她对这本书的赞赏与厚爱。但考虑到我本人因患老年黄斑变性导致视力减退,而且本书的合作编著者章梓雄院士已经离我们而去,修订本书会使我常常想起我们过去的交往而心生悲痛,因此犹疑再三。在出版社和很多朋友的支持和鼓励下,考虑到广大读者,特别是年轻读者的需求,乃下决心用一年多的时间来完成这一心愿。

本书是一本粘性流体力学的基础性教材。12年来粘性流体力学在研究与应用上有了很大进步,无论是计算方面还是试验方面都日新月异,更有一些新的学科出现,但是万变不离其宗,这个“宗”就是粘性流体力学的基础理论和基本规律。我们追求的是通过本书帮助读者对粘性流体力学的基本理论和方法有更透彻、更准确的理解,从而喜欢它,应用它。从这个角度出发,本次修订并未对本书的章节结构作大的变动,而是根据十多年来教学使用和读者研习中的体验,对各章内容再进一步精雕细刻,使之更臻完善。希望通过这一次再版为读者提供一本从内容到形式都更加精美的书籍。愿年轻学子通过研读本书而更加喜爱流体力学这门学问,能学习和体验大师们在推动流体力学发展中的创造性思维。

令人悲痛的是本书的合作编著者章梓雄院士于2007年6月13日突然于香港去世。我与章教授自1983年春天我去美国衣阿华(Iowa)大学水力学研究所做访问学者时相识。他在名片上把Iowa译成“爱我华”,使我第一次体会到他内心对祖国与民族的热爱与眷恋。后来我在他的指

导下完成了“透水平板引起的波陷现象(wave trapping)”的研究。一年的时间里从相识、相知到成为学术上的挚友。1984年我离开美国回国前,他曾真情流露地向我表示希望能对中国的流体力学发展和教育作出贡献。1985年我第一次邀他访问清华大学水利系,此后他多次回到祖国讲学并指导研究。章教授自1985年以来在国内多所大学设立了流体力学奖学金。1991年他受聘香港大学,与国内流体力学界的交流更加深入和紧密。实至名归,2003年章梓雄教授当选为中国科学院院士。这对他是很大的激励,他把提升国内海洋科技与工程作为自己的使命,多方奔走,陆续在青岛、大连、上海、广州召开研讨会,然后于2006年在北京召开香山会议,讨论加强中国海洋科技与工程的战略。可惜天不假年,2007年因脑部突然出血而去世。本书的再版,也算做对他的一个纪念吧。

本书修订过程中得到了清华大学余锡平、贺五洲、李玉柱、付旭东教授和北京航空航天大学王晋军教授和其他同仁的支持和帮助。余锡平教授在清华大学水利系为研究生讲授流体力学课程时曾使用本书多年。此次修订余锡平教授审阅了修订后的全部书稿,并作了多处补充与修改,在这里特对他表示真挚的谢意。

这次修订征求了章梓雄教授的夫人 Gladys 和女儿 Anna 的意见,得到了她们的支持。并且我们乐于把稿费捐给清华大学水利系作为鼓励研究生学习流体力学的奖学金。

我还想借这个机会表达对我妻子邓秀君女士的衷心谢意。近五十年来我们荣辱与共,同甘共苦,共同度过了人生的跌宕起伏。1994年我开始着手写本书第1版,后来写《非粘性流体力学》,到现在对本书第1版进行修订,由于她的支持与帮助才得以使我尽享了写作的快乐。

董曾南

2011年2月

第 1 版序言

本书是章梓雄和董曾南两位教授在粘性流体力学专业特有心得之余的精心之作。本书汇集两位作者多年教学和科研的经验,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,这个伟大工程当时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,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(基础和应用并重等价)学说之突破首例。该学说之所以能兼顾基础和应用,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。对于该边界层理论的全面发展和有紊流情形下之现象,本书述之,不憚其详,由此建立了基本理论,以备预作将来该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,这是本书作者的主要目的之一。

在这些基础上,两位作者希望此书能有助水力学教师们提升理论修养,有益于有关专业从事科研参考之用,看来必能如愿以偿。由于本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读者,协助提高怡然领悟之乐趣。

吴耀祖
1996年腊月

* 吴耀祖是美国科学院院士,美国加州理工学院教授。

第 1 版前言

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,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、环境或其他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,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12章。第1章与第2章介绍粘性流动的基本概念与基本方程。第3~5章介绍边界层理论。第6~8章阐述紊流的基本理论与方程。第9~12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—1927)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

目 录

第 1 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	2
1.1.3 流体的粘性	7
1.2 粘性流动的基本方程式	9
1.2.1 研究流体运动的两种方法	9
1.2.2 雷诺输运方程	11
1.2.3 连续方程	12
1.2.4 雷诺第二输运方程	13
1.2.5 动量方程	13
1.2.6 能量方程	17
1.2.7 粘性流动中一点的偏应力张量	19
1.2.8 粘性流动基本方程式	20
1.2.9 变形速率张量	21
1.2.10 本构方程	24
1.2.11 纳维-斯托克斯方程	27
1.2.12 纳维-斯托克斯方程的边界条件和初始条件	28
1.3 明槽流动的纳维-斯托克斯方程	30
1.3.1 不可压缩粘性流体在无界流场内的流动	30
1.3.2 纳维-斯托克斯方程中的压强项改变为流体动 压强	31
1.3.3 明槽水流纳维-斯托克斯方程	32

1.4 粘性流动的相似律	32
1.5 涡量方程	33
参考文献	39
第2章 纳维-斯托克斯方程的解	40
2.1 平行流动	40
2.1.1 库埃特流动	41
2.1.2 泊肃叶流动	43
2.2 运动平板引起的流动	47
2.2.1 突然加速平板引起的流动(斯托克斯第一问题)	47
2.2.2 振动平板引起的流动(斯托克斯第二问题)	48
2.3 平面驻点流动(希门茨流动)	50
2.4 重力作用下的平行流动	54
2.5 平行平面间的脉冲流动	56
2.6 奇异摄动法举例	58
2.7 低雷诺数流动	61
2.7.1 斯托克斯方程	62
2.7.2 斯托克斯方程的一些基本解	64
2.7.3 绕过球体的均匀流动	66
2.7.4 奥辛近似	69
2.8 边界层流动	71
参考文献	76
第3章 边界层微分方程式	78
3.1 边界层的基本特征	78
3.2 边界层微分方程式	82
3.2.1 二维平面边界层微分方程式	82
3.2.2 沿二维弯曲壁面及轴对称曲面的边界层方程	85
3.3 边界层厚度	90
3.3.1 边界层位移厚度	90
3.3.2 边界层动量损失厚度	91
3.3.3 边界层能量损失厚度	92
3.3.4 举例	92
3.4 边界层方程的相似性解	93
3.5 边界层的分离现象	97

3.5.1	分离现象	97
3.5.2	边界层流速分布特点与分离现象	98
	参考文献	102
第 4 章	边界层微分方程式的精确解	103
4.1	绕顺流放置平板的边界层流动	103
4.2	绕过楔形体的边界层流动	114
4.3	绕过柱体的边界层流动	119
4.4	顺流放置平板的尾流	123
4.5	平面层流射流	127
4.6	圆形层流射流	132
4.7	二维管道进口段流动	135
	参考文献	136
第 5 章	边界层微分方程式的近似解	138
5.1	边界层动量积分方程式与能量积分方程式	138
5.2	顺流放置平板边界层流动的近似解	140
5.3	二维边界层流动的卡门-波豪森近似方法	144
5.4	边界层方程近似解与精确解的比较	151
	参考文献	154
第 6 章	紊流	155
6.1	由层流到紊流的转换	156
6.1.1	圆管流动的转换	156
6.1.2	壁面边界层流动的转换	157
6.2	层流稳定性理论	159
6.2.1	层流稳定性基本概念	159
6.2.2	奥尔-佐默费尔德方程	161
6.2.3	奥尔-佐默费尔德方程的主要特性	163
6.2.4	稳定性理论应用于顺流放置的平板边界层流动	164
6.2.5	曲壁面层流边界层的稳定性问题	165
6.2.6	影响层流稳定性的其他因素	170
6.3	猝发现象	173
6.4	紊流的统计平均方法	178
6.4.1	时间平均法(时均法)	179

6.4.2	空间平均法	180
6.4.3	统计平均法(系综平均法)	180
6.4.4	各态遍历假设	182
	参考文献	184
第7章	紊流的基本方程	186
7.1	紊流连续方程和雷诺方程	186
7.2	紊流能量方程	189
7.2.1	紊流瞬时流动的总能量方程	189
7.2.2	紊流时均的总能量方程	190
7.2.3	紊流时均流动部分的能量方程	192
7.2.4	紊流脉动部分的能量方程	193
7.2.5	能量方程的积分形式	193
7.3	紊流的涡量方程、旋涡的拉伸	197
7.4	紊流计算中的 k 方程与 ϵ 方程	200
7.4.1	紊流脉动动能方程(k 方程)	201
7.4.2	紊流能量耗散率方程(ϵ 方程)	204
7.5	紊流的半经验理论	204
7.5.1	涡粘性模型	205
7.5.2	混掺长度理论	206
7.5.3	涡量传递理论	209
7.5.4	卡门相似性理论	210
7.5.5	普适流速分布律	213
7.6	紊流的基本特性	217
	参考文献	218
第8章	紊流扩散与离散	219
8.1	分子扩散的非克定律	220
8.2	移流扩散方程	221
8.2.1	移流扩散方程	221
8.2.2	扩散方程	222
8.3	随机游动与分子扩散	223
8.4	紊流扩散	226
8.4.1	泰勒紊流扩散理论	226
8.4.2	欧拉法紊流扩散方程	229

8.5 剪切流中的离散	231
参考文献	234
第9章 紊动射流及尾流	235
9.1 射流及尾流	235
9.2 紊动射流及尾流的厚度和中心流速的沿程变化	237
9.2.1 恒定射流	238
9.2.2 尾流	239
9.3 平面紊动射流	242
9.3.1 微分方程解	242
9.3.2 动量积分解	245
9.4 圆形紊动射流	247
9.4.1 圆形紊动射流的流速分布	247
9.4.2 圆射流的紊动特性	248
9.5 单独物体后的平面尾流	251
9.5.1 平面尾流的流速分布	251
9.5.2 平面尾流的紊动特性	254
参考文献	256
第10章 圆管紊流	257
10.1 圆管中的流速分布律	258
10.2 圆管紊流的阻力	263
10.3 粗糙圆管	266
10.3.1 管道流动按粗糙的分区	267
10.3.2 粗糙圆管的流速分布	269
10.3.3 粗糙圆管的阻力规律	273
10.3.4 实用管道	273
10.4 管流的紊动特性	275
10.4.1 管流中脉动流速与紊流切应力	275
10.4.2 圆管紊流的断面能量平衡	278
10.4.3 圆管紊流的频谱	283
参考文献	285
第11章 紊流平板边界层	286
11.1 紊流平板边界层的流速分布与分区结构	286

11.2	紊流平板边界层的紊动特性	291
11.3	紊流平板边界层的能量平衡	295
11.4	紊流平板边界层的厚度和阻力	299
11.5	粗糙平板紊流边界层	303
	参考文献	307
第12章	明槽紊流	308
12.1	明槽紊流的分区结构与流速分布	308
12.1.1	二维明槽均匀紊流理论分析	309
12.1.2	分区结构与流速分布	312
12.2	明槽紊流的阻力	315
12.3	明槽紊流的紊动特性	317
12.3.1	涡粘度与混掺长度	317
12.3.2	紊流度	319
12.3.3	明槽紊流的能量平衡	324
12.4	粗糙壁面明槽紊流	325
12.4.1	粗糙壁面的理论零点	325
12.4.2	粗糙壁面明槽紊流的流速分布	327
12.4.3	粗糙壁面明槽紊流的紊流度分布	328
12.4.4	河流中的紊流	330
	参考文献	331
附录	场论与张量基本运算知识	333
	参考书目	343
	名词索引	344
	人名索引	354