

力学丛书·典藏版 —27

流体力学概论

L. 普朗特
〔德〕 K. 奥斯瓦提奇 著
K. 维格哈特

LX



科学出版社

力学丛书·典藏版 27

流体力学概论

L. 普朗特
K. 奥斯瓦提奇
K. 维格哈特

郭永怀 译
陆士嘉



科学出版社

1981

内 容 简 介

本书原是德国科学家普朗特的名著,自第六版起由他的学生加以增补修订出版。内容丰富,物理概念清楚,论述深入精辟,旨在为初学者、高年级大学生及航空、水利、气象等方面有关工程技术人员提供一个流体力学的导引。

全书共分九章。前三章是基础部分,后几章论述在航空、水利、气象诸方面的流体力学理论和应用。书中排印小号字的内容系用以提供进一步的知识,以便对有关问题获得更为深刻的见解。

与一般的流体力学的数学理论不同,书中尽可能地避免复杂的数学分析,而着重物理直观,旨在阐明流体力学的基本概念及问题的力学本质,培养读者的独立思考能力,强调工程应用是本书的又一特点,对于诸如航空、水利、气象等工程技术领域的许多重要问题均有叙述。

本书在每章末都给出了许多文献,书末并列参考书,以供进一步查考探索。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学概论 / (德)普朗特(Prandtl, L.)等著;郭永怀,陆士嘉译.
—北京:科学出版社,2016.1

(力学名著译丛)

书名原文:Führer durch die Stromungslehre

ISBN 978-7-03-046976-2

I. ①流… II. ①普… ②郭… ③陆… III. ①流体力学 IV. ①035

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第006910号

责任编辑:赵彦超 赵敬伟 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1981年5月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2016年3月第二次印刷 印张:20 7/8

字数:549,000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译 序

《流体力学概论》一书原是德国著名力学家普朗特的著作，于1942年初版，到1957年共出了五版。普朗特逝世后，他的几个学生又按照原著的论述系统，增补了许多新的内容，仍用原名于1965年出版，作为原著的第六版。新版综述了自二十世纪初到六十年代流体力学的研究成果，在论述上保持了原著强调物理直观的特点，着重从观察物理现象出发，对流体运动进行研究分析，找出现象的物理本质和关键问题，然后将主要的物理关系用简化的数学模型表达出来，并进行理论计算。这是不同于其他流体力学理论书籍的。

原作者普朗特原习机械工程，后转而研究流体力学，因而实用观点很强。他解决问题的办法是重视在实际中遇到的矛盾问题，通过实验寻求了解其物理本质，再导出数学方程，用以总结提高所得的物理概念，从而得出定量结果，并对照实验结果找出答案。他反对在没有了解现象的物理本质以前，单纯搞烦琐的数学推演。这对于改变二十世纪初期流体力学只强调研究理想流体的脱离实际的方法有很大影响。如普朗特曾从观察流体流动的实践中提出了著名的粘性边界层理论，解释了当时在理论流体力学中只能作为疑题提出的有阻力现象，为研究阻力问题提供了理论基础，对推动近代流体力学的发展起了重要的作用，就是一个例证。

普朗特生前一面在大学教书，一面在研究所主持科学研究，研究涉及的范围很广，在流体力学方面有：边界层理论和边界层控制、湍流的发生、机翼理论、风洞试验、可压缩流理论、传热理论以及有关气象学上的一些问题等，并在教学和科研工作中培养了一大批研究人员，形成了一个学派，对流体力学和航空工程等学科的发展起了重要的推进作用。他是世界公认的近代流体力学奠基

人。

本书是作为教科书来撰写的，对原作者及其学派曾作过较多研究的几个方面叙述较多，但对于理论流体力学的其他学派以及稀薄空气动力学、电磁流体力学、空间飞行等方面就很少或没有提到。有关新的实验技术和计算方法，尤其是电子计算机发展后流体力学的新的应用领域更未涉及，这是本书不足之处。

中国科学院力学研究所郭永怀同志生前曾按原书第三版的英译本(1952年出版)译为中文于1966年出版。这次根据德文第七版修订本(1969年出版)译出，仍采用郭译原书名出版，作为中译本的新版。

本书在重新翻译过程中，对凡能保持原译文的地方都尽量采用原译文(如第一、二章等)，只作了少量文字修改，有些注释也仍然保留。译名中区别不大的，基本上仍用原译名(如用“声速”不用“音速”)。由于目前国内对于流体力学名词所用符号尚未统一，书中符号也基本按原译文，不作变动。符号的下角标则按要求改用汉语拼音字母(少数笔画少的仍用汉字，如“上”、“下”等)，为便于读者查阅，另附表以资对照。

忻鼎定同志认真仔细地校订了全部译稿，并作了文字修饰，特此致谢。

陆士嘉

1978年9月

序 言

近代流体力学在其奠基人普朗特逝世以后，仍在不断地向前发展。因此，作为本书新版的主要编写人，我们有责任力求继续按照大家所熟知的、我们尊敬的老师普朗特的那种清晰直观的表达方式来增加书的新内容。在这方面，他生前在哥廷根的同事们给了我们很大的支持。饶塔改编了有关不可压缩流体的摩擦问题，屈歇曼补充并阐明了有关机翼和飞机方面的问题，主要是有关跨声速和超声速领域里的一些新发展的问題。随后，德特默林写了流体动力机械的概述。舒、路德维格和克莱因施密特等三人又分别改写了流体的传热和高速边界层、实验学以及有关流体力学在气象学上的应用等几章内容。为了适应新的发展，我们又在内容安排上对原著作了一些更动；特别是气体动力学那一章，因为有基本性意义，我们把它提到前面去了。

在一本单独的书里，自然不可能把流体力学所涉及的各个领域都讨论到，因而必须从迅速增加的大量资料中，选取合适的内容。在这方面，我们也象对待表达方式那样，是尽量按照普朗特的原来想法去作的。因此，我们只用两个例子来说明关于磁场里电导体的流动问题，而对于稀薄气体的流动问题则没有涉及。但是在另一方面，对于高超声速流动，包括随之产生的极高温状态和摩擦过程，就讲得比较多；有关有热交换和无热交换的边界层问题，都按照这方面的最新成果写出。对于跨声速和超声速的最新机翼问题以及有关流体机械情况的论述，在叙述上我们都是不惜篇幅的。我们也按当前的认识，对鸟类和水禽的推进方式作了注释。至于在动力气象学的广阔领域方面，则只主要改写了普朗特讨论过的一些问题。此外，在准备出版新版的这段时间里，主要编写人也来不及把所有的“个别问题”都补充进来。

这个新版也和它的原著一样，是一本教科书。对于所提到的流体力学问题，我们都详细地讨论了它们的基本物理现象和概念，以便使读者能建立起思维模型；而在数学推导上，则只指明一下，以求很快得出结论，并与实验结果作比较。我们这样做，是为了实现普朗特原来的意图：“希望能通过本书把流体力学所涉及的各个领域，按照一条思路介绍给读者”。我们参加编写本书新版的人，都希望仍能达到这一目的。

非常感谢蒂尔曼博士(哥廷根)以及其他许多同专业的同事们在提供参考资料和进行辅助工作方面所给予我们的帮助。

K. 奥斯瓦提奇

K. 维格哈特

1965年7月于维也纳和汉堡

目 录

译序

序言

第一章 液体和气体的特性、平衡	1
1.1. 液体的特性	1
1.2. 应力的理论	2
1.3. 流体中的压力	5
1.4. 流体中的压力分布(不计重力)	7
1.5. 气体的特性	8
1.6. 重液体的平衡	12
1.7. 重气体的平衡	16
1.8. 大气压和液压的交互作用, 液体压力计	20
1.9. 减压, 气压计	23
1.10. 在其他力场中流体的平衡	25
1.11. 表面张力(毛细现象)	28
第二章 流体运动学, 无粘性流体动力学	33
2.1. 前言	33
2.2. 流体运动学	33
2.2.1. 表示运动的方法	33
2.2.2. 连续性	37
2.3. “理想”无粘性流体动力学	40
2.3.1. 流动流体中的力, 柏努利压力方程	40
2.3.2. 柏努利方程的推论	45
2.3.3. 流体压力的进一步讨论	49
2.3.4. 两股流体的汇流, 间断面, 涡旋的形成	53
2.3.5. 间断面的进一步讨论, 压力的测量	56

2.3.6. 均质无粘性流体运动的进一步讨论, 无旋流动 (位势流)	59
2.3.7. 位势运动的进一步讨论	65
2.3.8. 有环量的位势运动, 翼型的升力, 马格努斯效应	73
2.3.9. 无粘性流体的有旋运动, 涡丝	77
2.3.10. 定常运动的动量定理	82
2.3.11. 关于动量定理的另一些例子	86
2.3.12. 速度脉动情况下流动的动量定理	90
2.3.13. 液体的表面波	92
2.3.14. 明渠里的水流	100
第三章 有显著密度变化的流动 (气体动力学)	103
3.1. 前言	103
3.2. 压力的传播, 声速	104
3.3. 体积有显著变化的一维定常流动	111
3.4. 火箭	118
3.5. 能量定理	120
3.6. 正激波理论	125
3.7. 多维超声速流动, 绕角的流动, 气体射流	130
3.7.1. 绕角的超声速流动	130
3.7.2. 气体自由射流的发展过程	132
3.8. 二维超声速流动的一般近似法	134
3.9. 有弱扰动的流动	138
3.10. 绕翼型的二维超声速流动, 空气动力系数	144
3.11. 不同马赫数时, 翼型上的速度分布	152
3.12. 跨声速和高超声速相似律	156
3.13. 弹体	161
3.14. 流动的损失对于形成涡旋和阻力的影响	169
3.15. 热转换和极值温度	172
第四章 粘性流体的运动, 湍流, 流体阻力, 工程应用	179
4.1. 粘性 (内摩擦), 纳维-斯托克斯方程	179
4.2. 动力相似性, 雷诺数	185

4.3. 粘性流体运动的一般特性	187
4.4. 层流边界层	194
4.5. 湍流的形成	200
4.6. 通体湍流	210
4.6.1. 湍流的运动学	210
4.6.2. 湍流的动力学	215
4.6.3. 湍流中的掺混	218
4.6.4. 交换系数和混合长度	221
4.7. 个别湍流问题	223
4.7.1. 壁面湍流	223
4.7.2. 管内流动(管流)	228
4.7.3. 自由湍流	229
4.7.4. 湍流边界层	234
4.8. 流动的分离和涡旋的形成	237
4.9. 控制边界层的措施	244
4.10. 二次流. 三维边界层	249
4.11. 粘性起主导作用的流动	254
4.12. 轴承润滑的流体动力学理论	257
4.13. 等截面管和渠道中的流动	265
4.14. 变截面渠道中的流动	273
4.15. 流体中运动物体的阻力	280
4.15.1. 阻力公式总论	280
4.15.2. 阻力的分类	283
4.15.3. 运动着的物体和运动着的流体	284
4.16. 流体阻力理论	285
4.16.1. 基本概念	285
4.16.2. 特殊情形	288
4.16.3. 摩擦阻力	291
4.16.4. 阻力与远处状况之间的联系	295
4.17. 关于流体阻力	298
第五章 对流传热和传质. 高速边界层	312

5.1. 关于低速的强迫流动和自然对流的导言	312
5.2. 低速强迫传热	313
5.2.1. 引言	313
5.2.2. 管内传热,一般的和层流的流动	316
5.2.3. 管内的湍流传热	320
5.2.4. 有关历史性问题的一些评述	323
5.2.5. 平板的传热	324
5.2.6. 厚物体绕流的传热	326
5.2.7. 气流由壁面吹出时的传热	329
5.3. 强迫流动中的传质简述	330
5.4. 由密度差引起自然对流所产生的传热	332
5.4.1. 引言	332
5.4.2. 在铅直热壁面上的自然对流	334
5.4.3. 在水平圆柱体附近的自然对流	336
5.4.4. 热源	338
5.4.5. 绕水平平板的热流动	339
5.5. 固体在高温气流中的溶解和气化	342
5.6. 高速边界层	343
5.6.1. 概论	343
5.6.2. 表面压力为常值的二维平板和锥体	345
5.6.3. 在柱体(机翼)和旋转体上的驻点	350
5.6.4. 沿气流方向的压力变化和侧滑柱体(机翼)	351
5.7. 从层流到湍流的转捩点	353
5.8. 边界层和无粘性外流之间的相互作用	355
5.9. 高超声速流动情况下的离解过程	358
5.10. 其他	360
5.11. 气体动力效应,在壁面上的滑行	360
第六章 空气动力学和水动力学的实验方法	366
6.1. 建立完善的实验条件	366
6.2. 风洞	369
6.2.1. 概论	369
6.2.2. 低速风洞	370

6.2.3. 高亚声速风洞	371
6.2.4. 跨声速风洞	372
6.2.5. 超声速风洞	373
6.2.6. 高超声速风洞	377
6.2.7. 激波管	378
6.3. 测量技术	380
6.3.1. 观察流动的光学方法	380
6.3.2. 速度的测量	382
6.3.3. 方向的测定	385
6.3.4. 模型上作用力的测量	386
6.3.5. 其他测力方法	388
6.3.6. 摩擦阻力	389
6.4. 船舶试验	392
第七章 飞行器、推进装置和流体机械	396
7.1. 亚声速翼型	396
7.1.1. 典型低速流态	396
7.1.2. 低速平板翼	399
7.1.3. 厚度和前缘半径的影响	401
7.1.4. 贴体流动的粘性影响	403
7.1.5. 气流分离的影响	404
7.1.6. 压缩性的影响	408
7.2. 翼型设计问题: 改变剖面形状和控制边界层	411
7.3. 机翼的旋涡系	414
7.4. 大翼展机翼	416
7.4.1. 等下洗流, 椭圆分布	416
7.4.2. 任意的升力分布	421
7.5. 古典飞机	426
7.6. 后掠翼飞机	428
7.7. 斜置翼	430
7.8. 马赫数对斜置翼的影响	431
7.9. 有限翼展后掠翼	434
7.9.1. 无迎角后掠翼	435

7.9.2. 有迎角后掠翼	436
7.9.3. 机翼的展向阻力分布	438
7.9.4. 气流分离和涡旋	441
7.10. 后掠机翼的设计问题	442
7.11. 后掠翼设计的阻力问题	445
7.12. 小展弦比的三角翼飞机	447
7.13. 绕细长翼的流动	450
7.14. 在超声速流中薄翼的线性化理论	452
7.15. 小展弦比机翼理论	458
7.16. 超声速锥型流理论	463
7.17. 有亚声速和超声速前缘的机翼理论	466
7.18. 发动机(推进器)的推力	467
7.19. 螺旋桨	469
7.20. 船舶螺旋桨	472
7.21. 有壳螺旋桨	476
7.22. 风车	477
7.23. 在空气流中的燃烧器	478
7.24. 冲压喷气发动机	480
7.25. 涡轮喷气发动机	483
7.26. 鸟类的飞翔	484
7.27. 水族动物的推进	486
7.28. 流体机械概论	487
7.29. 涡轮(动力)机	494
7.30. 涡轮工作机	501
7.31. 动液耦合器和动液变矩器	507
7.32. 涡流管	508
第八章 在气象学上的应用	516
8.1. 地球自转对大气中和海洋中的无粘性流动的影响	516
8.1.1. 基本原理, 地球自转运动	516

8.1.2. 最简单的大气模型——转盘上的流体	518
8.1.3. 气旋和反气旋, 罗斯比波	520
8.2. 摩擦风及其类似现象	522
8.2.1. 科氏力的作用	522
8.2.2. 粘性湍流的近似计算	525
8.2.3. 地面摩擦引起的压力场的衰减	526
8.2.4. 地面摩擦随时间和空间的变化	528
8.2.5. 风对(海)洋流的影响	529
8.3. 两种不同密度的流体	530
8.3.1. 坝上溢流, 冷空气侵袭	530
8.3.2. 交界面上的波系	533
8.4. 密度连续变化时的分层流体	535
8.4.1. 伯耶克内斯定理	535
8.4.2. 内波	537
8.4.3. 可压缩介质中的内波	540
8.4.4. 稳定分层流体中剪流的稳定性界限	544
8.5. 在地转流动中速度场和密度场或温度场之间的关 系	548
8.5.1. 连续场	548
8.5.2. 锋面	551
8.6. 气旋	553
8.6.1. 位旋和埃特尔涡旋定理	553
8.6.2. 在气旋中的应用	554
8.6.3. 地转平衡的稳定性, 热带气旋	556
8.7. 大气环流	560
8.7.1. 一般环流	560
8.7.2. 斜坡风, 山风和谷风	563
第九章 其他类型问题	568
9.1. 气蚀	568
9.1.1. 气蚀的产生和气泡模型	568
9.1.2. 全气蚀流动	571
9.2. 水锤, 滑行面	574

9.2.1. 冲击现象	574
9.2.2. 连续现象	576
9.2.3. 水上的滑行面	577
9.3. 风所产生的水面波	579
9.4. 水和空气的混合物	581
9.4.1. 空气中的水滴	581
9.4.2. 空气中液体射流的破碎	582
9.4.3. 水中的空气泡	586
9.5. 空气流中的颗粒	589
9.5.1. 实际应用	589
9.5.2. 风的作用	591
9.6. 水流中的颗粒	592
9.6.1. 河流中沙、砾石等的运动	592
9.6.2. 悬浮物质的特性	594
9.6.3. 输运物质的重量	596
9.6.4. 物质输运(流失)对河床的影响	599
9.7. 加速流体中的物体, 流体动力的远距作用力	600
9.8. 旋转物体或旋转坐标系	604
9.9. 关于血液循环系统内的流动	614
9.10. 电磁力影响下的流动	619
9.10.1. 泊阿苏依-哈特曼流动	620
9.10.2. 在二维拉瓦尔喷管内等离子体的可压缩、无粘性流 动	622
参考书目	628
下角标符号表	635
中外文人名对照表	636
名词索引	644

第一章 液体和气体的特性。平衡

1.1. 液体的特性

液体之所以异于固体，在于液体的质点比较容易移动。要想改变固体的形状，必须施加一定的力（有时可能相当大），可是要改变液体的形状，只要能有充分的时间任其变形，就用不着施加外力。液体在变形速度大的情况下也有抗力，但是这种抗力当流动一旦停止便迅速消逝。液体的这种抗拒变形的特性就叫做粘性。在4.1中我们将仔细地讨论粘性。除了普通易流动的液体之外，还有粘性很大的液体，它们对于变形的抗力是相当大的（但是当液体运动一停止，这抗力就等于零）。对于非晶形的固体，则可以有各种不同程度的流动性。例如，玻璃在热了之后就具有这种不同程度的流动性，而沥青以及类似的物质在常温下就显示出这种性质。

实验：把一桶沥青倒置，视温度的不同它要几天或者几个星期才能完全流出来。流出来以后的沥青形成一个扁饼，虽然它确实继续在流动，人们却可以在上面走动而看不出痕迹；但是，如果在上面站了一会儿，那就会留下脚印。要是用锤子猛敲，它会象玻璃一样地破碎。

在研究液体的平衡时，我们只讲处于静止状态的，或者流动得很缓慢，以致可以把它当作处于静止状态的液体。因此，我们就可以忽略抗拒变形的抗力而并不损害准确性，并且，我们立刻就可以得出液体状态的以下的定义：**液体在平衡时对于变形没有抗力。**

根据物质分子运动论的概念，物体的最微小的质点（分子）在不断地运动；正是这种运动的动能表现为热。从这个观点出发，液体和固体的区别，在于液体的质点并不象固体的那样围绕固定位置振动，而是有时迁移位置¹⁾（当

1) 更为详细的解释可参看[1.1]。

局部热流动特别大的时候)。假如在液体里有了应力,则这种位置迁移就容易发生,并沿应力梯度方向引起屈服。当液体处于静止状态时,这种屈服就足以使应力差很快地消失;但是,当液体的形状在改变时,就会产生应力而且形状的改变越快应力越大。随着温度上升,非晶固体会逐渐软化;软化可以设想是这样发生的:假如把固体加热,也就是说,如果增加分子运动的能量,最初所发生的,仅是少数质点碰巧在那个时候有特别大的振幅而迁移了位置;继续加热,迁移位置的越来越多,最后,在固体里面迁移位置成为普遍的现象。对于结晶体来说,从固体状态转变为液体状态的过程,通常是以溶解的方式不连续地实现的,也就是说,这是由于规则的晶体结构被破坏的缘故。

液体的另一个特性,是它对体积变化有很大的抗拒力。要想把一升的水压进半升的容器里是很不可能的一件事;如果把它放进一个两升的容器里,容器只能半满。但是,水并不是绝对不能压缩的,在高压下,可以将它压缩到看得出的地步(大约一千个大气压¹⁾可以使水的体积减少百分之四)。类似的关系也适用于其他液体。

1.2. 应力的理论

在这里值得提一下,关于固体在平衡时所受的力的普遍定理也可以应用到液态物体上去。为了证实这一点,时常利用一个专门的“刚化原理”。这个原理是根据以下的考虑:“任何能自由运动的体系,其平衡不会因为任一可运动部分的随后刚化而受到影响;这就是说,可以想象把平衡的液体的任何部分刚化起来,而并不扰动平衡。于是,刚体平衡的定理就可以应用到已经刚化了的那部分液体上去了。”²⁾不过,要绕一个弯,利用刚体来导出一般力学的平衡定理,这种办法,是并不绝对必要的。这些定理完全可以应用到内部有运动自由的“静止的质点系”上去(虽然这里考虑整个体系处于平衡而没有利用这种内自由度)。只要我们是讨论实际的

1) 关于压力的单位,参看 1.3.

2) 自然,这里不是指的聚合状态转化时与体积变化有关的刚化(凝固),而是指没有任何位移和体积变化的理想的刚化。