

原书
第11版

普朗特流体力学基础

[德] H. 欧特尔 等著
朱自强 钱翼稷 李宗瑞 译



科学出版社

www.sciencep.com

035/90

2008

普朗特流体力学基础

原书第十一版

〔德〕H. 欧特尔 等 著

朱自强 钱翼稷 李宗瑞 译

科学出版社

北京

图字: 01-2005-6191

内 容 简 介

德国科学家普朗特于 1942 年出版了其名著《流体力学概论》。随后, 其学生奥斯瓦提奇等增补修订出版了该书的第六至第九版。德国流体力学教授欧特尔等又进一步增补、修订, 出版了第十版和第十一版。本书为第十一版的中译本。欧特尔等保留了普朗特名著第一版的内容作为本书前六章的主要内容, 第七至第十四章则介绍了当代流体力学发展的不同分支; 并将书名由《流体力学概论》改为《普朗特流体力学基础》。

与一般流体力学论著强调数学理论不同, 普朗特的名著(本书前四章)尽可能地避免复杂的数学分析, 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。欧特尔等撰写的后十章也体现了普朗特的风格和意图。后十章中有些内容可在普朗特的原著中以某种形式看到, 但绝大部分是最近六十年来流体力学不同分支最新发展的总结。

本书的内容丰富, 物理概念清晰, 论述深入精辟, 并强调工程应用, 旨在为初学者、高年级大学生及航空、水利、气象等相关流体力学发展方向的工程技术人员提供流体力学的导引。

图书在版编目(CIP)数据

普朗特流体力学基础/(德)欧特尔等著. 朱自强, 钱翼稷, 李宗瑞译.
—北京: 科学出版社, 2008
ISBN 978-7-03-022091-2
I. 普… II. ①欧… ②朱… ③钱… ④李… III. 流体力学 IV. O35
—中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008) 第 073868 号

责任编辑: 孙立新 胡 凯/责任校对: 张怡君
责任印制: 赵德静/封面设计: 王 浩

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)
2008 年 6 月第一次印刷 印张: 38 3/4
印数: 1—3 000 字数: 742 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈明辉〉)

中译本序

路德维格·普朗特以他在水力学、空气动力学、气体动力学等方面的重要贡献对流体力学整体的发展产生了巨大的影响,正是他在 20 世纪前半叶的开拓性研究奠定了现代流体力学的基础。以他 1913 年出版的《流体和气体运动的理论 (Lehre von der Flüssigkeit und Gasbewegung)》和 1931 年出版的《气体理论概论 (Abriss der Strömungslehre)》为基础的划时代的著作《流体力学概论 (Führer durch die Strömungslehre)》于 1942 年问世。书名表明了普朗特以深思熟虑的论述引导读者进入流体力学不同领域的意图。作者以其特有的方式,不用大量的数学推导而直观地进入物理问题的核心,特别强调对基本物理现象和流体力学概念的描述,并在此基础上建立简化的数学模型,而方法的公式化处理则被放在次要地位。这正与他本人从事研究工作的精神一致。

普朗特的《流体力学概论》第一版是当时论述流体力学的唯一著作,即使现在,也是该领域最重要的著作之一。普朗特去世后,他的学生克劳斯·奥斯瓦提奇 (Klaus Oswatitsch) 和卡尔·维格哈特 (Karl Wieghardt) 承担了再版该书的工作,并以同样清晰直观的表述方式增补了许多近代流体力学新发展的内容。

当第九版绝版时,出版社提出了出版新版的要求,我们非常高兴地承担了这一任务。本书前四章保持了普朗特 1942 年第一版的思路特点,但对原著正文作了语言学上的修改,成为引言、液体和气体的性质、流体运动学和流体动力学等四章。这些章节直到今天仍作为科学和工程专业学生的流体力学概论课程内容。我们在这些章节中保留了绝大部分普朗特原著的内容,但在第三章增加了“流动拓扑学”一节,在第四章增加了“非牛顿介质中的流动”一节。本书论述流体力学和空气动力学基本方程的第五、六两章,扩展了原著中的材料并形成了研究后续各章中流体力学不同分支的基础。

本书与前些版的主要区别在于对流体力学附加专题的处理上。流体力学持续地向前发展使之涉及的专题如此之广泛。我们在编著本书时必须做出取舍。我非常感谢我的同事们,如 K. R. 斯雷尼瓦萨 (K. R. Sreenivasan)、U. 弥勒 (U. Müller)、J. 瓦那茨 (J. Warnatz)、U. 理德尔 (U. Riedel)、D. 埃特林 (D. Etling)、M. 玻尔 (M. Böhle) 等,他们牢记普朗特的意图,修改了他们各自研究领域的相应章节,并将最近六十年来的最新发展呈现在第七至十四章中。这些章中某些可在普朗特的原著中以某种形式看到,如机翼空气动力学、传热、分层流、湍流、多相流、大气与海洋中

的流动、热涡轮机械等, 但已作了巨大修改补充; 其他一些则完全是新增的, 如流体力学不稳定性、带化学反应的流动、血液循环生物流体力学等。

各章中所引的文献被有意识地精简至为理解内容和保证内容完整性所绝对必需的。精简了大量历史性的引述, 这些内容可参见以前各版。

本书的主要对象是科学和工程专业的学生, 他们对流体力学已有某些最为基本的理解, 并希望获得对流体力学各分支的一般了解。为易于他们的接受, 本书有意推迟了矢量的应用并避免使用积分定理, 对于更一般和简洁的数学推导则列出了相应的文献。为便于学生检验对所述内容的掌握, 在第二至六章我们都新增了习题。本书对专业科研或工业界人士在研究和解决流体力学问题时也可提供有价值的启迪。

我们真诚希望我们是遵照普朗特原著的意图来介绍流体力学各不同分支的。

本书第一至六, 八, 九, 十三章由 H. 欧特尔 (H. Oertel) 编写, 第七章由斯雷尼瓦萨, 第十章由弥勒, 第十一章由瓦那茨和理德尔, 第十二章由埃特林, 第十四章由玻尔编写。再次感谢这些同事, 他们的无数建议尽体现在本书中。

我非常感谢朱自强、钱翼稷、李宗瑞等教授们为本书中译本的出版作出的贡献及他们对原书中笔误和印刷错误等提出的修改意见。特别感谢科学出版社的支持与合作。

H. 欧特尔

2005 年 12 月

译者前言

近代流体力学奠基人之一路德维格·普朗特具有独特、非凡的直观洞察能力,他十分重视对流体力学基本物理现象的观察、实验和分析,善于抓住物理本质和描述流体力学概念,并在此基础上建立简化的数学模型。他以这种研究流体力学的风格、作风和方法形成了一个学派。在 20 世纪前半叶中,紧密结合航空发展的需要,他的开拓性研究建立了小黏性边界层理论、升力线、升力面和最小诱导阻力等论述的机翼理论、层流稳定性概念和湍流混合长度理论以及气体动力学的相关理论。在上述诸多方面的重要贡献对流体力学的发展产生了巨大的影响,奠定了现代流体力学的基础,并培养了大量的人才。他撰写的《流体力学概论》一书,从 1942 年初版,到 1957 年共出了五版。其撰写方式和他本人从事研究工作的风格相一致,论述和介绍流体力学内容的方式明显区别于其他流体力学的理论书籍。在普朗特去世后,他的学生奥斯瓦提奇等按原著的论述系统,增补了许多新的内容,于 1965 年出版了第六版,再后来奥斯瓦提奇也已逝世,现代的德国流体力学教授欧特尔等继承普朗特的风格,按序言中叙述的系统,增补了大量更新的近代流体力学发展的内容,于 2001 年以第十版,2002 年第十一版形式相继出版此书,书名为《普朗特流体力学基础》。

普朗特的《流体力学概论》受到了我国著名流体力学专家们的重视以及学习流体力学的学生和从事流体力学研究的青年工作者的欢迎。我国著名流体力学家、原中国科学院力学研究所的郭永怀教授曾按原书第三版的英译本(1952 年出版)译成中文于 1966 年出版;著名流体力学家、普朗特唯一的中国学生、原北京航空航天大学陆士嘉教授曾按德文的第七版(1969 年出版)译成中文于 1981 年出版。这次我们有幸在科学出版社的大力支持下,将最新一版(第十一版)(参考了该版的英译本(2004 年出版)和两位前辈的前述中译本)译成中文出版。我们真诚希望它能对我国科学及工程专业的学生和年青的科研及工业界的工作者学习流体力学和了解其各分支的概貌有所帮助。

陆士嘉教授在她毕生的教学和科研中始终倡导着普朗特的精神和风格,以此教育和培养了大批我国流体力学工作者。今年她离开我们已二十周年,作为她的学生,我们谨以本书的出版表达对她的缅怀之情。

本书第一至四章由李宗瑞译,第五至十一章由朱自强译,第十二至十四章由钱翼稷译。全书内容由朱自强统一和校核。我们衷心地感谢博士生王晓璐,他在紧张

的课题研究过程中,利用休息时间作了前十一章的录入和全书的编排工作。特别感谢科学出版社的大力支持和合作。

言 前 言

译 者

2006年1月于北京

目 录

中译本序

译者前言

第一章 引言	1
第二章 液体和气体的特性	13
2.1 液体的特性	13
2.2 应力状态	14
2.3 液体的压力	16
2.4 气体的特性	21
2.5 气体的压力	22
2.6 大气压和液压的交互作用	26
2.7 在其他力场中的平衡	28
2.8 表面张力(毛细现象)	31
2.9 习题	34
第三章 流体运动学	37
3.1 表示运动的方法	37
3.2 流动的加速度	40
3.3 流动拓扑学	42
3.4 习题	47
第四章 流体动力学	50
4.1 无黏性流体动力学	50
4.1.1 连续性和伯努利方程	50
4.1.2 伯努利方程的推论	53
4.1.3 压强的测量	60
4.1.4 间断面和漩涡的形成	61
4.1.5 位势流	64
4.1.6 翼型的升力和马格努斯效应	75
4.1.7 定常流动的动量平衡定理	77
4.1.8 自由液体表面的波	85
4.1.9 习题	92

4.2	黏性流体动力学	96
4.2.1	黏性 (内摩擦), 纳维-斯托克斯方程	96
4.2.2	动力相似性, 雷诺数	100
4.2.3	层流边界层	102
4.2.4	湍流的形成	104
4.2.5	充分发展的湍流	113
4.2.6	流动分离和漩涡的形成	120
4.2.7	二次流	126
4.2.8	黏性起主导作用的流动	128
4.2.9	管子和渠道中的流动	134
4.2.10	流体中运动物体的阻力	139
4.2.11	非牛顿介质中的流动	147
4.2.12	习题	151
4.3	气体动力学	156
4.3.1	压强的传播, 声速	156
4.3.2	定常可压缩流动	160
4.3.3	能量守恒定理	164
4.3.4	正激波理论	165
4.3.5	绕角的流动, 自由射流	168
4.3.6	小扰动流动	171
4.3.7	绕翼型的流动	175
4.3.8	习题	180
第五章	流体力学基本方程	184
5.1	连续方程	184
5.2	纳维-斯托克斯方程	185
5.2.1	层流流动	185
5.2.2	湍流流动的雷诺方程	192
5.3	能量方程	196
5.3.1	层流流动	196
5.3.2	湍流流动	200
5.4	守恒律基本方程	201
5.4.1	基本方程的层次结构	201
5.4.2	纳维-斯托克斯方程	202
5.4.3	蜕化的模型方程	206

5.4.4	湍流的雷诺方程	212
5.4.5	多相流动	214
5.4.6	带有反应的流动	216
5.5	扰动的微分方程	218
5.6	习题	222
第六章	空气动力学	228
6.1	空气动力学基础	228
6.1.1	鸟的飞行和技术模拟	229
6.1.2	翼型和机翼	230
6.1.3	翼型和机翼理论	237
6.1.4	空气动力设备	252
6.2	跨声速空气动力学	253
6.2.1	后掠机翼	255
6.2.2	激波-边界层相互作用	258
6.2.3	流动分离	263
6.3	超声速空气动力学	265
6.3.1	三角机翼	265
6.4	习题	272
第七章	湍流流动	277
7.1	湍流流动基础	277
7.2	湍流的开始	278
7.2.1	线性稳定性	278
7.2.2	非线性稳定性	280
7.2.3	非正态稳定性	281
7.3	充分发展的湍流	282
7.3.1	混合长度的概念	282
7.3.2	湍流混合	284
7.3.3	湍流中的能量关系	285
7.4	湍流的分类	286
7.4.1	自由湍流	286
7.4.2	沿边界的流动	288
7.4.3	旋转和分层流, 带有曲率影响的流动	291
7.4.4	风洞中的湍流	293
7.4.5	二维湍流	296

7.5	湍流的新发展	300
7.5.1	实验方法	300
7.5.2	小尺度湍流	301
7.5.3	惯性区和耗散区中的间隙性	302
7.5.4	湍流的计算	303
7.5.5	展望	305
第八章	流体力学不稳定性	306
8.1	流体力学不稳定性基础	306
8.1.1	流体力学不稳定性实例	306
8.1.2	稳定性的定义	311
8.1.3	局部扰动	314
8.2	分层流不稳定性	315
8.2.1	瑞利-贝纳尔对流	315
8.2.2	马兰贡尼对流	325
8.2.3	扩散对流	328
8.3	流体动力学不稳定性	333
8.3.1	泰勒不稳定性	333
8.3.2	格特勒不稳定性	338
8.4	剪切流不稳定性	339
8.4.1	边界层流动	340
8.4.2	托尔明-施里希廷不稳定和横流不稳定性	345
8.4.3	开尔文-亥姆霍兹不稳定性	359
8.4.4	尾迹流	361
第九章	对流传热和传质	364
9.1	传热和传质的基础	364
9.1.1	自由和强迫对流	364
9.1.2	热传导和热对流	366
9.1.3	扩散和对流	367
9.2	自由对流	368
9.2.1	垂直平板上的对流	368
9.2.2	水平圆柱处的对流	372
9.3	强迫对流	373
9.3.1	管流	373
9.3.2	边界层流动	377

9.3.3	流动中的物体	382
9.4	热交换和质量交换	383
9.4.1	平板处的质量交换	383
第十章	多相流	386
10.1	多相流的基础	386
10.1.1	定义	387
10.1.2	流态	389
10.1.3	流态图	389
10.2	流动模型	392
10.2.1	一维双流体模型	392
10.2.2	混合模型	395
10.2.3	漂移流模型	397
10.2.4	泡和滴	399
10.2.5	喷雾流	401
10.3	水力元件中的压强损失和体积分数	405
10.3.1	水平直管中的摩擦损失	405
10.3.2	加速度损失	409
10.4	密度波的传播速度和临界质量通量	412
10.4.1	密度波	412
10.4.2	临界质量通量	414
10.4.3	气穴	420
10.5	两相流中的不稳定性	423
第十一章	带反应的流动	428
11.1	带反应流动的基础	428
11.1.1	速率律和反应阶	428
11.1.2	前向和逆向反应的关系	429
11.1.3	基本反应和反应分子性	430
11.1.4	速率系数与温度的关系	432
11.1.5	反应系数与压强的关系	434
11.1.6	反应历程的特性	435
11.2	层流反应流动	441
11.2.1	预混火焰的结构	441
11.2.2	预混火焰的火焰速度	443
11.2.3	灵敏度分析	445

11.2.4	非预混的逆流火焰	446
11.2.5	非预混射流的火焰	448
11.2.6	快速化学反应的非预混火焰	448
11.2.7	用等离子体净化废气	450
11.2.8	腐蚀反应器中的流动	451
11.2.9	非均质的催化	453
11.3	湍流反应流动	454
11.3.1	综述和概念	454
11.3.2	直接数值模拟	455
11.3.3	湍流模型	456
11.3.4	平均反应速率	458
11.3.5	涡-破裂模型	462
11.3.6	大涡模拟 (LES)	463
11.3.7	湍流非预混火焰	463
11.3.8	湍流预混火焰	472
11.4	高超声速流	478
11.4.1	再入大气飞行中的物理-化学现象	478
11.4.2	化学非平衡	479
11.4.3	热非平衡	481
11.4.4	再入飞行器上的表面反应	484
第十二章 大气及海洋中的流动		486
12.1	大气及海洋流动的基础知识	486
12.1.1	引言	486
12.1.2	旋转系中的基本方程	486
12.1.3	地转流动	489
12.1.4	涡	490
12.1.5	埃克曼层	493
12.1.6	普朗特层	496
12.2	大气中的流动	498
12.2.1	热风系统	499
12.2.2	热对流	501
12.2.3	重力波	503
12.2.4	涡	506
12.2.5	全球大气环流	511

12.3	海洋中的流动	513
12.3.1	风驱动流动	513
12.3.2	水波	515
12.4	大气及海洋流动的应用问题	517
12.4.1	天气预报	517
12.4.2	温室效应及气候预测	519
12.4.3	臭氧洞	522
第十三章	血液循环中的生物流体力学	525
13.1	生物流体力学基础	525
13.1.1	呼吸系统	527
13.1.2	血液循环	529
13.1.3	血液流变学	533
13.2	心脏中的流动	535
13.2.1	心脏的生理学与解剖学	535
13.2.2	心脏的结构	537
13.2.3	心脏激发的生理学	541
13.2.4	心脏中的流动	543
13.2.5	心脏瓣膜	547
13.3	血管中的流动	550
13.3.1	非定常管流	553
13.3.2	非定常的动脉流动	555
13.3.3	动脉支	557
第十四章	热力涡轮机械	559
14.1	热力涡轮机械的基本原理	559
14.2	轴流式压气机	562
14.2.1	流量系数, 压强系数, 反力度	562
14.2.2	设计方法	566
14.2.3	亚声速压气机	568
14.2.4	跨声速压气机	571
14.3	离心式压气机	574
14.3.1	离心式压气机中流动的物理现象	574
14.3.2	流量系数, 压强系数, 以及效率	578
14.3.3	滑移系数	580
14.4	燃烧室	581

840	14.4.1 有传热效应的流动	581
848	14.4.2 燃烧室的几何形状	583
850	14.5 涡轮机	584
858	14.5.1 基本原理	584
870	14.5.2 效率, 流量系数, 功系数, 以及反力度	585
876	14.5.3 冲击式与反力式涡轮级	586
	中外人名对照表	589
	索引	594

第一章 引言

现代流体力学的发展与其奠基者普朗特 (L.Prandtl) 是密不可分的。正是他于 1904 年发表的那篇关于小黏性流体运动的著名论文提出了边界层理论。在其后十年中, 他发表的翼型理论的论文奠定了计算摩擦阻力、传热以及流动分离等的基础。他提出了以普朗特混合长度表示湍流动量交换的湍流模型的基本概念。他关于气体动力学方面所做的工作重新塑造了这一研究领域, 如对可压缩流的普朗特-格劳特 (Glauert) 修正、激波和膨胀波理论, 以及喷管中超声速流的第一张照片等。他还将流体力学的方法应用于气象学, 并因在弹性力学、塑性力学、流变学等方面的贡献而成为这些领域中的先驱者。

普朗特在理论和实验的结合上特别成功, 总是用实验来验证他的理论概念, 因此他的实验都非常重要并精确, 著名的扰流线实验就是一个例子。正是通过这个实验他发现了湍流边界层和湍流对流动分离的作用。扰流线不是简单地来自灵感, 而是他对埃菲尔 (Eiffel) 球体阻力测量存在矛盾这一现象深思熟虑的结果。将扰流线放在不同位置上做两个实验就足以证实湍流的形成及其对流动分离的影响。为进行实验, 他进一步发展了风洞及相应的测量设备, 如哥廷根风洞和普朗特总压管。他的科学结论常似来自直觉, 所给出的数学推导仅用作物理解释, 但它确实给出精确的结果和简化的物理模型, 按海森堡 (W.Heisenberg) 的说法, 普朗特无需计算就能“看出”微分方程的解。

我们选择了一些例子使读者了解普朗特建立的流体力学的脉络, 以及本书每章的内容和模式。以流体动力学为例, 我们讨论了流过汽车的气流的不同状态——不可压流 (第四章, 流体动力学) 和流过机翼的气流的不同状态——可压缩流 (第六章, 空气动力学)。

讨论流过汽车的气流时, 我们要将流过表面的自由流和以速度 u_∞ 运动的汽车与静止街面之间的气流相区别。在压强达最大值的驻点, 气流分开; 沿引擎罩和汽车基座扰流板的气流因加速导致压强下降和负的向下对街面的压力, 如图 1.1 所示; 另一股气流在挡风玻璃处变慢, 并在下游沿车顶和后货厢减速, 从而导致压强增加和正的升力, 这时沿车的下表面仍保留着作用于街面的负的向下的压力。

在汽车上下表面上的黏性流 (4.2 节) 局限于边界层内, 并流入汽车尾端的黏性尾流中。风洞实验中使用烟气使气流成为可见的, 并显示出从汽车尾端开始在下流形成了一个回流区, 如图中的黑色区。在边界层和尾流区外, 气流基本上是无黏的

(4.1 节)。

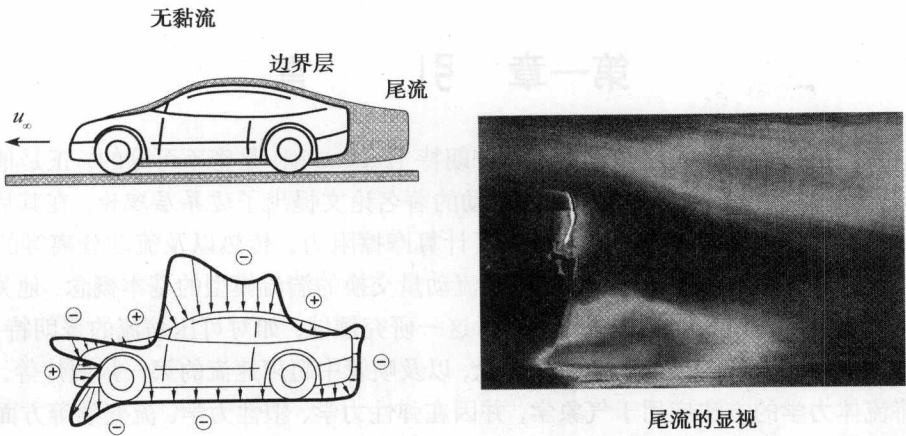


图 1.1 流过汽车的气流

为了能认识不同的流动状态，从而建立起汽车空气动力设计的基础，普朗特精心安排了从液体和气体的特性运动学，到无黏和黏性流体动力学的叙述脉络(第二章至第四章)。沿着这一脉络，读者将成功地获得对这第一个例子物理上的理解。

第二个流动的例子是绕机翼的有激波的可压缩流体(6.2 节和 4.3 节)。设流向机翼的自由来流具有一般民航机的速度 u_∞ ，即高亚声速。图 1.2 显示了沿机翼横截面的流动状态和负压分布情况。还是用烟气使气流成为可见的。从驻点开始，驻点线分叉，分别顺机翼的吸力面(上表面)和压力面(下表面)前进。在上表面，气

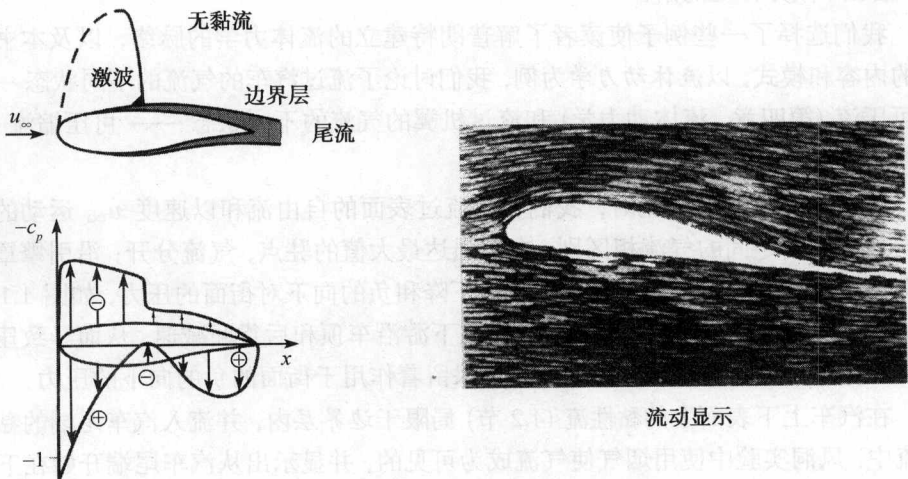


图 1.2 流过机翼的气流