

力学名著译丛

边界层理论

上册

H. 史里希廷 著

科学出版社

力学名著译丛

边界层理论

(上册)

H. 史里希廷 著

徐燕侯 徐立功 徐书轩 译

孔祥言 卞荫贵 校

科学出版社

1988

内 容 简 介

本书是世界名著，中译本分上、下册出版。上册包括此书的第一、二部份，即边界层理论基础、层流边界层理论和热边界层理论。

本书可供力学、航空航天、造船、机械、动力、气象、海洋学和海洋工程等领域的研究生、教师、技术人员和科研人员参考。

H. Schlichting

BOUNDARY-LAYER THEORY

7th Edition

McGraw-Hill Book Company, 1979

力学名著译丛

边界层理论

(上册)

H. 史里希廷 著

徐燕侯 徐立功 徐书轩 译

孔祥言 卞荫贵 校

责任编辑 晏名文

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988年2月第一版 开本：850×1168 1/32

1988年2月第一次印刷 印张：16 7/8

精：—750 插页：3 平：2

印数：平：1—1,600 字数：434,000

ISBN 7-03-000045-5/O·9

定价：布脊精装 5.90 元

平 装 4.80 元

出版者的话

本书是 H. 史里希廷教授的名著。1951 年的第一版是德文版。本书根据 1979 年的第七(英文)版译出。此英文版是 J. Kestin 教授由作者的德文原稿直接翻译出版的。中译本上册中序言、引言、第一、三、七、十、十三章是徐燕侯译的;第二、四、八、十二、十五章是徐立功译的;第五、六、九、十一、十四章由徐书轩译出。上册由孔祥言校订,最后由卞荫贵教授审定。

第七(英文)版作者序

本书第六(英文)版出版于1968年,它与1965年的第五(德文)版没有多大差别。本书第一(德文)版是在1951年出的。从1951年到1968年的这段时间内,总是在每次德文版之后接着再出英文版,而所有的英译本均由 Kestin 教授出色地完成。

1975年,当我决定写本书的新版本时,我得出了如下结论:以前那种继德文版之后再出英文版的程序不再是适宜的。原因在于这样做会大大增加印刷成本。所以我向两家出版公司(在 Karlsruhe 的 G. Braun 和在纽约的 McGraw-Hill) 建议,这次只出一个英文的新版本。承蒙他们同意,谨此致谢。

和以前的几版一样,这次我也力图在不改变本书基本结构的前提下,从这一时期出现的边界层理论的丰硕成果中选入最重要的贡献。我希望本书的宗旨始终不变,即以工程师易于接受的方式着重介绍理论方面的研究成果。

本书仍旧分成四个部分(粘性流体运动的基本定律;层流边界层;转捩;湍流边界层)。有关**增加**的内容,我想作几点说明。由于大型电子计算机的出现,许多过去认为不可解的问题,现在变得可以处理了。这些问题包括中等高的 Reynolds 数下 Navier-Stokes 方程的数值解(第四章),层流和湍流边界层方程的数值积分(第九章),以及层流边界层稳定性理论中 Orr-Sommerfeld 方程的显式数值积分(第十四章)。新版中增加的其他内容还有:非定常驻点流的 Navier-Stokes 方程的精确解(第五章),二阶层流边界层理论(第七章和第九章)。完全修订过的章节有:二维不可压缩湍流边界层的计算(第二十二章),计及传热效应的可压缩层流边界层的稳定性(第十七章 e),以及叶栅流动中的损失(第二十五章)。

除了补充以上新内容外,我还应说明有意略去的一些题目。我没有讨论高超声速流中化学应对边界层中流动过程的影响,也没有讨论磁流体动力学、低密度流动和非 Newton 流体中的边界层。和前几版一样,在本版中我仍旧认为不必去讲解湍流统计理论,因为现在已经有了其他很好的专著。

许多章的参考文献目录又扩充了很多。插图的数目增加了约 65 幅,但有 20 幅老的插图已被删去;页数增加了约 70 页。尽管如此,我希望本书保持原有特点,而且仍旧能为读者提供流体物理学中这一重要分支的概貌。

当我写这个新的手稿时,再次十分高兴地得到几位同事的大力协助。K. Gersten 教授为层流边界层部分写了有关二阶边界层的两节(第七章 f 和第九章 j)。这是他近年来取得良好研究成果的一个专门领域。T. K. Fanneloep 教授帮助我完全改写了第九章 i,即边界层方程的数值积分法。在湍流边界层部分,E. Truckenbrodt 教授改写了第二十二章中的大部分内容,即二维边界层和轴对称边界层。加州理工学院 L. M. Mack 博士写了新的一节:超声速流中边界层稳定性,即第十七章 c。由他来写这部分内容是十分恰当的。J. C. Rotta 博士对第四部分湍流边界层作了全面述评和许多补充。对于俄文文献,我得到了 Mikhailov 教授的大力帮助。翻译工作再次委托给 J. Kestin 教授。对于以上诸位有价值的合作,我谨表示由衷的谢意。

当我写第五(德文)版时,曾得到几位同行朋友的帮助,我再次向他们表示感谢。不用说,他们所写的部分仍旧保留在这一版中。这些部分是:第八章中 F. W. Riegels 博士写的可压缩层流边界层,第十二章中 K. Gersten 教授写的热边界层部分,以及第二十三章中 J. C. Rotta 博士写的可压缩湍流边界层。

我感谢 Gerda Wolf 夫人、Hide Kreibohm 夫人和 Leslie Giacin 夫人为本书手稿仔细准备清楚的抄件;Gerda Wolf 夫人还在图书资料方面给了我很大帮助。感谢 Rotta, Hummel 和 Starke 各位先生帮助我校对清样。

最后,还必需感谢 Verlag Braun 出版公司欣然支持了我的愿望,使得本书顺利地和大家见面了.

Hermann Schlichting

1978 年 8 月于 Goettingen

第七(英文)版英译者序

本书是 H. Schlichting 教授《边界层理论》一书的英文本第四版。这个新版本也是在与作者紧密合作下产生的。为了最后确定内容和措辞,我到 Goettingen 去拜访过他几次。我要感谢 Schlichting 教授的殷勤接待,以及 McGraw-Hill 出版公司为这几次旅行所提供的部分资助。

这次不再出德文版本,作者将修改稿直接寄给了我。

我要感谢 H. E. Khalifa 教授,他帮助进行了校对。我的夫人 Alicia 作了作者索引和主题索引,并在困难的条件下将其完满地打印出来。我的秘书,在 Providence 的 Giacin 夫人和在 Goettingen 的 Kreibohm 夫人熟练地打出了手稿。我由衷地感谢她们耐心的工作。两家出版公司,Karlsruhe 的 G. Braun 公司和纽约的 McGraw-Hill 公司,同过去一样,总是不厌其烦地满足我们有关本书出版的要求。

J. Kestin

1978 年 8 月于 Providence, Rhode Island

第一(德文)版作者序

大致自本世纪初以后,流体动力学领域的现代研究已经取得了巨大的成就,已经能够对观测到的现象提供理论上的解释.这是上个世纪的经典流体动力学所不能做到的.在过去五十年间,流体动力学有三个分支发展得特别好,它们是边界层理论、气体动力学和机翼理论.本书将讨论边界层理论这个分支,这是现代流体动力学中最老的分支,它是 L. Prandtl 于 1904 年建立起来的.当时他成功地阐明了,怎样处理粘性很小的流体的流动(特别是,从应用观点来看最重要的水和空气的流动),才能进行数学分析.这个问题是这样解决的:只在粘性不可忽略的区域内,即在紧靠物体的邻域中的一个薄层内考虑摩擦影响.这一概念澄清了过去不能理解的许多流动现象.最重要的是,它使与阻力产生有关的问题能够进行理论分析.当时航空工程科学正在迅速发展,因而能很快将这些理论结果应用到实际问题中去.而且,航空工程确实提出了许多问题,这些问题可以借助新的边界层理论予以解决.很久以来,航空工程师就把边界层概念当作日常应用的概念.如果现在没有边界层概念,那简直是不可想像.在其它有流动问题的机械设计领域中,特别是涡轮机设计中,边界层理论的进展要慢得多.但是,最近这些新概念已出现在这类应用中.

本书主要是为工程师写的.1941—1942 年间的冬季学期,作者为 Braunschweig 航空研究院的科学工作者讲授了一门课.本书就是这门课程的产物.战后, Braunschweig 工程大学为物理和机械工程学生举办的许多专题讲座中,已经利用了上述教材.开过第一遍课程之后, H. Hahnemann 博士整理出一套讲义.经作者审阅并加以补充之后,此讲义由科学文献公司 (Zentrale für Wissenschaftliches Berichtswesen) 以油印形式出版,并在有限范围

内分送给有关的科学工作者。

战后几年,作者决定完全重编这个早期的教材,并以图书的形式出版。时机似乎特别有利,因为出版这样一本内容广泛的书的时机看来已经成熟,同时最近一、二十年的研究成果已使整个边界层理论领域日臻完善。

本书分成四个主要部分。第一部分包括绪论性的两章,其中阐明了边界层理论的基础,但是没有用到数学。随后几章在 Navier-Stokes 方程的基础上,对边界层理论作出了数学上的和物理上的证明。第二部分包括层流边界层理论和热边界层理论。第三部分讨论由层流到湍流的转捩现象(湍流的起因)。第四部分专门论述湍流。现在可以这样来概括,层流边界层理论大体上是完善的,其物理关系已经完全弄清楚;其计算方法已经基本制定,并且在许多情形下已经简化到对工程师没有困难的程度。在讨论湍流时,基本上只采用了根据 Prandtl 混合长度所导出的半经验理论。实际上,根据目前的看法,这些理论有许多缺陷。但是,迄今还没有想出更好的方法,即对工程师有用的方法来代替它。本书没有包括湍流的统计理论,因为至今还看不出这些理论对工程师有什么实际意义。

正如书名所表明的那样,本书重点放在问题的理论论述上。为此,我们力图使这些论述具有工程师易于掌握的形式。在浩瀚的实验资料中,我们只引用了少数结果,目的是使各种现象获得清晰的物理上的理解,并为所介绍的理论提供直接的证明。书中选用了一些同湍流有关的例子,因为它们构成半经验理论的基础。我们力图证明,实质性的进展并不是大量实验结果汇集而成的,而是由少量以理论研究为后盾的基本实验所取得的。

Hermann Schlichting

1950年10月于 Braunschweig

引 言

十九世纪末叶,流体力学这门科学开始沿着两个方向发展,而这两个方向实际上毫无共同之处.一个方向是**理论流体动力学**,它是从无摩擦、无粘性流体的 Euler 运动方程出发发展起来的,并达到了高度完善的程度.然而,由于这种所谓经典流体动力学的结果与实验结果有明显的矛盾——尤其是关于管道和渠道中压力损失这个非常重要的问题以及关于在流体中运动物体的阻力问题——所以,它并没有多大实际意义.正因为这样,注重实际的工程师为了解决在技术迅速发展中所出现的重要问题,自行发展了一门高度经验性学科,即**水力学**.水力学以大量的实验数据为基础,而且在方法上和研究对象上都与理论流体动力学大不相同.

本世纪初, L. Prandtl 因解决了如何统一这两个背道而驰的流体动力学分支而著称于世.他建立了理论和实验之间的紧密联系,并为过去七十年来流体力学异常成功的发展铺平了道路.就是在 Prandtl 之前,人们就已经认识到:在很多情形下,经典流体动力学的结果与实验结果不符,是由于该理论忽略了**流体的摩擦**的缘故.而且,人们早就知道了有摩擦流动的完整的运动方程(Navier-Stokes 方程).但是,因为求解这些方程在数学上极其困难(少数特殊情形除外),所以从理论上处理粘性流体运动的道路受到了阻碍.此外,在两种最重要的流体,即水和空气中,由于粘性很小,一般说来,由粘性摩擦而产生的力远小于其它的力(重力和压力).因为这个缘故,人们很难理解被经典理论所忽略的摩擦力怎么会在如此大的程度上影响流体的运动.

在 1904 年 Heidelberg 数学讨论会上宣读的论文“具有很小

摩擦的流体运动”中，L. Prandtl¹⁾ 指出：有可能精确地分析在一些很重要的实际问题中所出现的粘性流动。借助于理论研究和几个简单的实验，他证明了绕固体的流动可以分成两个区域：一是物体附近很薄的一层（**边界层**），其中摩擦起着主要的作用；二是该层以外的其余区域，这里摩擦可以忽略不计。基于这个假设，Prandtl 成功地对粘性流动的重要意义给出了物理上透彻的解释，同时对相应的数学上的困难做到了最大程度的简化。甚至在当时，这些理论上的论点就得到一些简单实验的支持，这些实验是在 Prandtl 亲手建造的水洞中做的。因此他在重新统一理论和实践方面迈出了第一步。边界层理论在为发展流体动力学提供一个有效的工具方面证明是极其富有成效的。自本世纪开始以来，在新近发展起来的空气动力学这门学科的推动下，边界层理论已经得到迅速发展。在一个很短的时间内，它与其他非常重要的进展（机翼理论和气体动力学）一起，已成为现代流体动力学的基石之一。

最近，关于边界层理论在数学上的合理性的研究，已引起了很大的重视。根据这些研究，边界层理论是更普遍的理论框架中的首次近似，这个更普遍的理论要计算完整的运动方程组的解的渐近展开。这个问题可以归结为所谓的奇异摄动方法，即用匹配渐近展开法求解。因此，边界层理论为我们提供了一个应用奇异摄动法的典型例子。流体力学中摄动方法的概述是由 M. Van Dyke²⁾ 撰写的。这些方法的基础可以追溯到 L. Prandtl 的早期贡献。

边界层理论在计算作用于（在流体中运动的）物体上的表面摩擦阻力方面获得了应用，例如零攻角平板所经受的阻力，船、机翼、机舱或涡轮叶片的阻力。边界层流动具有特殊的性质，即在某种

-
- 1) L. Prandtl., Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung, Proc. Third Intern. Math. Congress, Heidelberg, 1904, pp. 484—491; 也可参考 L. Prandtl, Gesammelte Abhandlungen Zur angewandten Mechanik, Hydro-und Aerodynamik (Collected Works), ed. by W. Tollmien, H. Schlichting and H. Görtler, vol. 11, pp. 575—584, Springer, Berlin, 1961.
 - 2) M. Van Dyke, Perturbation methods in fluid mechanics, Academic Press, 1964.

条件下,在紧靠固壁处的流动会变成倒流,同时引起边界层与固壁的分離。这将伴随着在物体尾迹中多少会明显地形成旋渦。因此,压力分布改变了,并且与无摩擦流中的压力分布有着显著的不同。这种偏离理想情形的压力分布是造成型阻的原因。因此型阻可以用边界层理论来计算。边界层理论给出了这样一个非常重要问题的答案,即为了避免这种不利的分离,物体应该具有什么样的形状。分离不是只限于在绕物体的外流中。也可以出现在流经管道的内流中。由涡轮机(旋转式压缩机和透平)叶片构成的通道中的流体流动问题,同样可以用边界层理论来处理。而且,发生在机翼最大升力点上的现象以及与机翼失速有关的现象,只有基于边界层理论才能理解。最后,固体与其绕流流体(气体)之间的传热问题,也属于这类边界层现象起决定作用的问题。

起初发展的主要是不可压缩流体中的层流边界层理论。因为在这种条件下,切应力的唯象假设早已存在于 Stokes 定律的形式中了。接着,大量的研究论文中发展了这个课题,并达到了如此完善的程度,以致目前可以认为:层流问题在主要方面已经解决了。后来,这个理论又扩展到了不可压缩湍流边界层。从实际应用的观点来看,不可压缩湍流边界层问题更为重要。诚然,在湍流情况下 O. Reynolds 早在 1880 年就引入了表观湍流应力或虚拟湍流应力这个具有基本重要意义的概念。但是,这个概念本身还不足以从理论上分析湍流流动。直到引入 Prandtl 的混合长度理论(1925 年),这才取得了重大的进展。Prandtl 的混合长度理论加上系统的实验,为借助于边界层理论进行湍流的理论研究铺平了道路。但是,关于完全发展的湍流的合理理论至今尚未建立。而从湍流的极端复杂性来看,这种情况还将继续一段相当长的时期。人们甚至还不能肯定,科学在这个任务上是否能获得成功。到了现代,由于新式飞机飞行速度急剧增加的推动,可压缩边界层中发生的现象已成为深入研究的课题。这种流动除了速度边界层之外,又出现了热边界层。热边界层的存在,在流体及其绕流物体之间的传热过程中起着重要的作用。在 Mach 数很高时,由于产生

摩擦热，固壁表面将加热到很高的温度(“热障”)。这个现象带来了一个难以分析的问题，而它的解决在飞机设计和了解人造卫星的运动中却是重要的。

从层流向湍流转换的现象是流体动力学中的基本现象。O. Reynolds 早在十九世纪末就首先对这一现象进行了研究。1914年，Prandtl 做了著名的圆球实验，并正确指出：边界层中的流动可以是层流的，也可以是湍流的。而且进一步指出：分离的问题，因而计算阻力的问题是受这种转换支配的。从层流向湍流转换过程的理论研究，是以 Reynolds 的假设为基础的，即承认湍流是由于层流边界层产生不稳定性的结果。1921年，Prandtl 开始进行转换的理论研究；经过许多徒劳无益的尝试之后，于1929年获得了成功。当时 W. Tollmien 从理论上算出了零攻角平板转换的临界 Reynolds 数。然而过了十多年之后，H. L. Dryden 及其同事们所进行的非常仔细的实验，才证实了 Tollmien 的理论。稳定性理论能够考虑到对转换有影响的许多因数(压力梯度、抽吸、马赫数、传热)。这个理论已得到很多重要的应用，其中之一就是设计阻力非常低的翼型(层流翼型)。

在一般流体动力学领域以及边界层领域中，现代研究的特点在于理论和实验的紧密结合。在大多数情形下，一些最重要的进展可以认为是理论研究所支持的少量基本实验的结果。在 A. Betz¹⁾ 所写的一篇论文中，回顾了边界层理论的发展历史，强调了理论与实验之间相辅相成的关系。在1904年 Prandtl 开创边界层理论之后约二十年中，几乎只有他自己的 Goettingen 学派在进行研究。形成这种局面的原因之一，可以认为是首次发表论文时的环境。1904年发表的边界层理论是很难令人理解的。直到1927年在伦敦召开的一次英国皇家航空学会会议上，当 Prandtl

1) A. Betz, Ziele, Wege und Konstruktive Auswertung der Strömungsformung, Zeitschr. VDI, 91(1949), 253.

的 Wilbur Wright 纪念讲演¹⁾发表之后,可以说才宣告了这个时期的结束。在以后的年代里,大致从 1930 年开始,其他的研究工作者,尤其是在英国和美国的研究工作者,也在边界层理论的发展中起了积极的作用。今天边界层理论的研究已经遍及全世界。它和其它分支一起,已成为流体力学的最重要支柱之一。

1931 年, W. Tollmien 在《实验物理手册》²⁾里面的两篇短文中,首次对这门学科分支作了评述。随后不久(1935 年),在 W. F. Durand 主编的《空气动力学理论》³⁾一书中, Prandtl 发表了全面的论述。在这当中的四十年间,这方面的研究论文的篇数已有了极大的增加⁴⁾。根据 1955 年 H. L. Dryden 发表的评论文章的统计,有关边界层理论的论文发表率,当时已达每年一百篇。在二十多年以后的今天,论文发表率又增加了二倍以上。像几个其它的研究领域一样,边界层理论已经达到这样大的篇幅,以致即使是在这个领域中从事研究工作的科学家个人;也不可能期望通晓它的所有专题。所以,在一本现代手册中,边界层理论的叙述工作已交给几位作者,这是很对的。至于边界层理论的发展史,最近已由 I. Tani⁵⁾予以追述了。

1) L. Prandtl, The generation of vortices in fluids of small viscosity (15th Wilbur Wright Memorial Lecture, 1927), *J. Roy. Aero. Soc.*, 31 (1927), 721-741.

2) 请查下册书末参考书目。

3) L. Prandtl, The mechanics of viscous fluids, Aerodynamic Theory (W. F. Durand, ed.), Vol. 3, 34-208, Berlin, 1935.

4) H. Schlichting, Some developments of boundary-layer in the past thirty years (The Third Lauchester Memorial Lecture, 1959), *J. Roy. Aero. Soc.*, 64 (1960) 63-80.

也可参阅: H. Schlichting, Recent progress in boundary-layer research (The 37th Wright Brothers Memorial Lecture, 1973), *AIAA Journal*, 12(1974), 427-440.

5) I. Tani, History of boundary-layer research, *Annual Rev. of Fluid-Mechanics*, 9 (1977), 87-111.

目 录

上册数值表目录.....	ix
第七(英文)版作者序.....	xi
第七(英文)版英译者序.....	xiv
第一(德文)版作者序.....	xv
引言.....	xvii

第一部分 粘性流体运动的基本定律

第一章 有摩擦的流体运动的概述	1
a. 真实流体和理想流体	1
b. 粘性	2
c. 可压缩性	6
d. 管流的 Hagen-Poiseuille 公式.....	7
e. 相似性原理; Reynolds 数和 Mach 数	10
f. 理想流体理论和实验的比较	20
第二章 边界层理论概述	25
a. 边界层概念	25
b. 分离及涡的形成	30
c. 管中和边界层中的湍流	44
第三章 可压缩粘性流体运动方程的推导 (Navier-Stokes 方程)	51
a. 流体流动的基本运动方程和连续方程	51
b. 变形体中一般应力系统	53
c. 流动中流体微元的应变率	56
d. 应力和应变率之间的关系	64
e. Stokes 假设	66

f. 体积粘性系数和热力学压力	68
g. Navier-Stokes 方程	71
第四章 Navier-Stokes 方程的一般性质	78
a. 根据 Navier-Stokes 方程推导 Reynolds 相似性原理 ...	78
b. 作为 Navier-Stokes 方程的“解”的无摩擦流动	81
c. 作为涡量输运方程的 Navier-Stokes 方程	81
d. 粘性很大 (Reynolds 数很小) 时的极限情形	85
e. 粘性很小 (Reynolds 数很大) 时的极限情形	86
f. R 趋于无穷大的数学解释	89
第五章 Navier-Stokes 方程的精确解	93
a. 平行流动	93
1. 直槽内的平行流动和 Couette 流动	94
2. 圆管流动的 Hagen-Poiseuille 理论	95
3. 两个同轴旋转的圆柱面之间的流动	98
4. 突然加速的平板壁面; Stokes 第一问题	101
5. Couette 流动的形成	103
6. 由静止开始的管内流动	104
7. 振动平板附近的流动; Stokes 第二问题	105
8. 一种一般类型的非定常解	107
b. 其他的精确解	108
9. 平面驻点流动 (Hiemenz 流动)	108
9a. 二维非定常驻点流动	111
10. 三维驻点流动	112
11. 旋转圆盘附近的流动	114
12. 收缩槽和扩张槽内的流动	121
13. 结束语	123
第六章 极慢运动	125
a. 极慢运动的微分方程	125
b. 平行流绕圆球的流动	126
c. 润滑的流体动力学理论	130
d. Hele-Shaw 流动	138