

**Turbulent Shear Layers
in Supersonic Flow**
(Second Edition)

超声速湍流剪切层

(第2版)

[美] 亚历山大·J. 斯米茨(Alexander J. Smits)

[法] 让-保罗·迪索热(Jean-Paul Dussauge)

著

刘洪 张斌 译

航空工业出版社

高超声速技术译丛

超声速湍流剪切层

(第2版)

[美] 亚历山大·J. 斯米茨 (Alexander J. Smits)

[法] 让-保罗·迪索热 (Jean - Paul Dussauge)

著

刘 洪 张 斌 译

航空工业出版社

内 容 提 要

本书的目的是集合超声速湍流剪切层行为方面最近的成果,以及呈现目前对这些流动的研究结论。本书第1章给出了可压缩湍流复杂性的综述;第2章讨论运动方程;第3章给出了湍流的平均方程;第4章引进了一系列理解可压缩湍流的重要概念,尤其强调了快速变形近似的发展;Morkovin假设和雷诺比拟在第5章讨论;第6章考虑了混合层的行为;第7和第8章分别处理了平均流动和零压力梯度边界层的结构;具有压力梯度和表面弯曲的复杂流动行为见第9章,其中快速变形近似及如何对这些流动提供有用的理解也在第9章进行了阐述;第10章论述了二维和三维流体中激波—边界层相互作用。

本书适合流体力学相关领域的研究人员阅读,也可作为高等院校相关专业的本科生、研究生及教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超声速湍流剪切层:第2版/(美)斯米茨
(Smits, A. J.), (法)迪索热(Dussauge, J. P.)著;刘
洪,张斌译.--北京:航空工业出版社,2016.2

(高超声速技术译丛)

书名原文:Turbulent Shear Layers in Supersonic
Flow (second edition)

ISBN 978-7-5165-0985-2

I. ①超… II. ①斯…②迪…③刘…④张… III.
①超音速流动—湍流流动—剪切层—研究 IV. ①O354.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第046952号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2014-3265

Translation from English language edition: *Turbulent Shear Layers in Supersonic Flow*,
by Alexander J. Smits and Jean-Paul Dussauge. Copyright © 2006 Springer New York.
Springer New York is a part of Springer Science + Business Media. All Rights Reserved.

超声速湍流剪切层(第2版)

Chaoshengsu Tuanliu Jianqieceng (Di 2 Ban)

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

北京隆元普瑞彩色印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016年2月第1版

2016年2月第1次印刷

开本:710×1000

1/16

印张:22.25

字数:447千字

印数:1—2000

定价:120.00元

《高超声速技术译丛》编委会

顾问：(按姓氏笔画排序)

王礼恒	史新兴	包为民	乐嘉陵
冯志高	刘永才	杜善义	杨卫
李椿萱	张立同	俞鸿儒	陶文铨
黄伯云	黄瑞松		

主任委员：郑耀

副主任委员：符松 孟华

委员：(按姓氏笔画排序)

王振国	方文军	刘洪	刘卫东
关成启	杨超	李仲平	李存标
李建林	李跃明	何国强	沈清
张天序	张香文	张蒙正	张新宇
陈振乾	林均品	周毅	宗群
桂业伟	高正红	高效伟	韩杰才
程克明	樊菁		

《高超声速技术译丛》序言

飞得更快、更高、更远，是人类永恒的追求。通常人们把大气层中飞行速度达到5倍声速以上的飞行称为高超声速飞行。相关的高超声速流动的理论研究始于20世纪40年代后期，我国的著名科学家钱学森先生和郭永怀先生都是高超声速概念的最早倡导者。

早在20世纪60年代，在突破3倍声速之前，人类就已经开始研究高超声速技术。美国开展的X-43A、X-51A、X-37B和HTV-2（Hypersonic Technology Vehicle 2）“猎鹰”等飞行器的飞行试验在高超声速领域占据了领先地位，并积累了宝贵的技术和经验。受其鼓舞，更是由于其潜在的重要战略意义和极高的应用价值，使得高超声速技术成为21世纪航空航天领域的研究热点之一，得到了世界范围的广泛关注。

我国在高超声速技术领域的研究方兴未艾，相关的科研院所和高等学校取得了令人瞩目的突破和积累，但与美国等航空航天发达国家相比仍有一定差距，亟待汲取其先进的研究经验，并藉此能够系统培养相关的科研人员。《高超声速技术译丛》的出版适逢其时，译丛旨在借鉴和总结美国等航空航天领先国家的经验，使其理论化、科学化和系统化，进而结合工程实践，以形成具有我国特色的高超声速技术理论与实践相结合的知识体系。

《高超声速技术译丛》主要涵盖飞行器总体技术、推进技术、气动力与气动热、材料与结构热防护、制导与控制、数值模拟与试验测量技术等专业方向，知识领域覆盖了高超声速飞行器研发设计、制造和试验等关键技术。译丛择优选取了美国航空航天学会等国外机构出版的高超声速及相关技术的经典著作，以飨读者。

本套译丛的出版得到了国内众多方面的大力支持。丛书凝结了高超声速研究领域专家的智慧 and 成果，承担着记载与弘扬科学成就、积累与传播科技知识的使命，具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性，既可以作为实际工作的指导用书，也可以作为相关专业人员的学习参考书。期望这套丛书能够有益于高超声速技术领域人才的培养，有益于高超声速技术的发展，有益于高超声速飞行器的研制工作。同时，希望能够吸引更多的读者来关心、支持和热爱高超声速技术，并投身其中做出贡献。

《高超声速技术译丛》编辑委员会
2012年5月

原书第 2 版序言

自从本书在 1996 年第一次出版以来，一系列新试验和数值计算都取得了显著进步。特别是，在合适雷诺数条件下的直接数值计算使我们对可压缩湍流的行为有了新的理解。这些进展是本书第 2 版的主要动机。我们借此机会对一些相对较老的材料进行重新整理，添加了一些解释性内容，并且纠正了错误和疏忽。我们尤其感谢 Sheng Xu 博士和 Jonathan Poggie 博士，他们帮助我们找到了这些错误并予以修正。

原书第1版序言

本书的目的是集合超声速湍流边界层行为方面最近的成果，并呈现我们目前对这些流动的结论。希望能够给读者提供该领域的通用介绍，无论他们是学生还是实践研究工程师或科学家，也希望能够帮助找到该领域未来工作的重点。大多数湍流或边界层的教科书都包含了超声速流动中湍流边界层的一些背景，但是这些内容通常相当粗略，或者已经过时。而 Kutateladze 和 Leont'ev (1964)，他们研究了可压缩气体中湍流边界层的特定问题，但是他们的重点主要放在积分运动方程的求解，对湍流本身的行为没有过多关注。Cousteix (1989) 发表了湍流的一些方面，但是只有一章致力于这个主题，并且他的综述虽然有用但并不详尽。本书的视野更加开阔，因为我们通过湍流剪切层行为的物理描述以及平均流动和湍流对各种不同扰动的响应来关注问题。例如，除了湍流混合层，我们还将考虑平板边界层有和没有压力梯度两种情况；考虑弯曲壁面，以及二维和三维中边界层与激波的相互作用。

最近，我们对于这些流动的理解已经取得了相当大的进步。进步主要是受到试验研究的驱使，虽然可压缩流动的数值模拟也取得了显著贡献。除了最近的工作，从 Fernholz 和 Finley (1976, 1980, 1981)，Fernholz 等 (1989) 以及 Settles 和 Dodson (1991) 汇编资料中，可以很容易地获得数据，并且其中所呈现的大量相关全新试验的信息也令人印象深刻。目前关注的高超声速飞行也同样激励着计算工作，并且 Delery 和 Marvin (1986) 以及 Lele (1994) 的综述对目前的可能性给出了详细讲解。尽管取得了这些成果，但是距离完成由马赫数、雷诺数、压力梯度、热传输、表面工况以及流动构型等可能因素构成的涡阵尚有很大的差距。因此，未来还有很多的工作要做。从最近高超声速飞行的失败中传达出一个很清晰的信息，为了显著提高对高速湍流的理解，我们需要从试验和数值计算研究多方面共同努力。

目前，我们开始构建关于高速边界层行为合理清晰的描述，尤其是湍流结构方面以及对压力梯度的响应和与激波的相互作用。对我们来说这是一个很适当的时机，我们可以把不同工作组的成果集中起来，并作为一个整体呈现我们目前所掌握的知识。我们承认当出现新的知识时，这个整体可能会改变，希望这些成果能够有助于激励这些新知识的出现。

我们主要关注点是压缩效应如何影响湍流剪切层行为，尤其是对边界层的影

响。研究主要限制在自由来流为超声速的边界层中,跨声速和高超声速流动不详细介绍。如果没有更精确的描述,我们通常处理的边界层都是自由来流马赫数在 $1.5 \sim 6$ 。设置低马赫数限制的原因是为了减少大范围混合亚声速和超声速区域引起的复杂性,而高马赫数限制的原因是为了避免真实气体和低密度效应的存在。而且,我们的研究限制在完全湍流中,高速流动中的稳定性和转换问题我们不做详细讨论。这些问题数量众多而且很重要,需要专门的课题来研究。

即使有这些限制,还是存在很丰富的研究经验,在第1章我们尝试给出可压缩湍流复杂性的综述。第2章讨论运动方程,湍流的平均方程在第3章给出,主要是发展一些有用的相似和量级参数。作为更进一步的背景,第4章引进了一系列理解可压缩湍流的重要概念,尤其强调了快速变形近似的发展。莫科温(Morkovin)假设和雷诺比拟在第5章讨论。第6章考虑了混合层的行为,第7和第8章分别处理了平均流动和零压力梯度边界层的结构。具有压力梯度和表面弯曲的复杂流动的行为见第9章,快速变形近似如何对这些流动提供有用的理解也在第9章进行了阐述。当流体被快速压缩,会形成激波,二维和三维流体中激波—边界层相互作用是第10章的主题,这一章主要讨论激波不稳定性所扮演的角色以及造成的分离现象。贯穿本书,我们尝试强调未来发展的一些可能性,包括未来试验的指导方针、计算工作的前景、湍流模型和快速变形方法。第2章和第3章,延伸至第4、第5和第7章,探讨了可压缩湍流描述中的一些基本元素。虽然在其他地方也能够找到这些工作,但我们认为用一种系统的方式介绍这些流动的基本性质是很有用的,尤其是对这个领域的新手来说。其他章节更加特定化,可能更适合那些已经有相关经验的读者。

没有大量的帮助,任何书都不可能出版。我们要感谢美国空军科研办公室、陆军研究办公室、海军研究局(ONR)、国防部高级计划研究局(ARPA)、国家航空航天局(NASA)总部、NASA兰利研究中心、NASA刘易斯研究中心,法国国家科学研究院(CNRS),法国国家航天航空研究中心(ONERA),埃梅斯项目(Project Hermès),以及多伦多国防研究机构(DRET)对我们研究工作的支持。NASA/斯坦福大学湍流研究中心支持了系列亚历山大·J. 斯米茨(AJS)的讲座,正是AJS提出了本书的想法。NATO-AGARD鼓励我们梳理几个其他出版物的数据,这个工作对我们开始这本书具有无价的意义。最后,还有其他一系列的人员一路上都帮助我们。对卡特帕里·斯林瓦森(Katepalli Sreenivasan)、丹尼斯·布什内尔(Dennis Bushnell)和莉萨·戈布尔(Lisa Goble),表达我们最诚挚的感谢。对汉斯·费尔霍茨(Hans Fernholz)、约翰·芬利(John Finley)、埃里克·斯皮纳(Eric Spina)和兰迪·史密斯(Randy Smith),允许我们对改编他们的文献而给予特别的感谢。让·库斯泰(Jean Cousteix)和John Finley对很多详细的评论

给出了很有用的帮助。为我们的妻子和家庭同意我们完成这项工作的时间给予最强烈的敬意。AJS 将他的努力归功于他的父母——本·斯米茨 (Ben Smits) 和特鲁斯·斯库弗-斯米茨 (Truus Schoof - Smits)，但他们在本书完成之前离开了人间。

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 序言	(1)
1.2 平板湍流边界层	(3)
1.3 压力脉动的传播	(11)
1.4 混合层	(12)
1.5 激波—湍流的相互作用	(16)
1.6 激波—边界层相互作用	(17)
1.7 测量技术	(20)
1.7.1 热线测速仪	(20)
1.7.2 激光多普勒测速仪	(25)
1.7.3 壁面脉动压力的测量	(28)
1.7.4 流动图像	(29)
1.8 总结	(33)
第2章 运动方程	(34)
2.1 连续方程	(34)
2.2 动量方程	(35)
2.3 能量	(38)
2.4 小结	(40)
2.5 可压 Couette 流动	(41)
2.6 涡量	(44)
第3章 湍流的基本方程	(48)
3.1 平均量的定义	(48)
3.2 平均流场控制方程	(51)
3.2.1 连续方程	(51)
3.2.2 动量方程	(52)
3.2.3 能量方程	(53)
3.2.4 湍动能方程	(53)

3.3 薄剪切层方程	(54)
3.3.1 特征尺度	(55)
3.3.2 连续性	(55)
3.3.3 动量	(57)
3.3.4 总焓	(61)
3.4 总结	(62)
第4章 基本概念	(63)
4.1 Kovasznay 模态	(63)
4.2 剪切流中的速度散度	(67)
4.3 涡流场诱导速度	(73)
4.4 快速变形概念	(74)
4.4.1 线性化脉动方程	(76)
4.4.2 在超声速流中的应用	(77)
4.4.3 快速变形近似	(78)
4.4.4 在无激波流动中的应用	(80)
4.4.5 湍流应力的激波关系	(82)
4.5 湍流马赫数	(83)
4.6 DNS 和 LES	(85)
4.6.1 均匀衰减湍流	(86)
4.6.2 遭受恒定剪切的湍流	(87)
4.6.3 可压缩湍流频谱	(87)
4.6.4 剪切流动	(88)
4.7 建模问题	(91)
第5章 Morkovin 假设	(94)
5.1 空间、时间及速度尺度	(94)
5.2 温度—速度关系	(96)
5.3 试验结果	(97)
5.4 $Pr_m = 1$ 结果分析	(100)
5.5 $Pr_m \neq 1$ 分析结果	(103)
5.6 混合层的雷诺近似	(106)
第6章 混 合 层	(111)
6.1 引言	(111)

6.2 不可压缩混合层的标度	(112)
6.3 可压缩混合层	(115)
6.4 可压缩性效应的分类	(119)
6.4.1 对流马赫数	(119)
6.4.2 相似性考虑	(121)
6.5 平均流标度	(122)
6.6 湍流剪切应力标度	(128)
6.7 自守恒条件	(130)
6.8 湍流法向应力	(133)
6.9 时空特性	(135)
6.10 可压缩性和混合	(137)
6.11 最后备注	(142)
第7章 边界层平均流特性	(144)
7.1 引言	(144)
7.2 黏性底层	(146)
7.3 对数区	(148)
7.3.1 不可压流动	(148)
7.3.2 可压缩流动	(156)
7.4 尾迹律	(163)
7.5 表面摩擦力关系	(168)
7.6 幂次律	(172)
7.7 总结	(174)
第8章 边界层湍流特性	(175)
8.1 引言	(175)
8.2 标度律	(175)
8.2.1 不可压缩流的谱标度	(177)
8.2.2 可压缩流的谱标度	(182)
8.3 湍流数据	(185)
8.3.1 不可压缩流	(186)
8.3.2 可压缩流	(192)
8.4 有序运动	(197)
8.4.1 内层结构	(198)
8.4.2 外层结构	(201)

8.5	相关性和总体平均	(204)
8.6	积分尺度	(213)
8.7	湍流的涡模型	(218)
8.7.1	内—外层相互作用	(222)
8.7.2	边界层涡结构综述	(223)
8.8	结语	(227)
第9章	受扰动的边界层	(229)
9.1	前言	(229)
9.2	扰动强度	(231)
9.3	壁面温度的阶跃变化	(233)
9.4	逆压梯度	(238)
9.4.1	Concavely 曲壁绕流	(241)
9.4.2	反射波流	(246)
9.4.3	Taylor - Görtler 涡	(247)
9.5	顺压梯度	(249)
9.6	连续扭曲	(250)
9.7	总结	(253)
第10章	激波—边界层相互作用	(255)
10.1	前言	(255)
10.2	压缩拐角干扰	(257)
10.2.1	表面摩擦	(258)
10.2.2	分离	(258)
10.2.3	逆流影响	(260)
10.2.4	激波运动	(261)
10.2.5	湍流增幅	(267)
10.2.6	三维性	(269)
10.3	快速变形和线性分析法	(270)
10.4	入射激波相互作用	(275)
10.5	等熵三维流动	(277)
10.6	三维相互作用	(279)
10.6.1	流场拓扑学	(280)
10.6.2	后掠压缩角的相互作用	(283)
10.6.3	尖鳍相互作用	(284)

10.6.4 钝鳍相互作用·····	(287)
10.7 交叉激波相互作用 ·····	(288)
10.8 结论 ·····	(289)
参考文献 ·····	(291)

第1章 绪 论

1.1 序言

可压缩湍流的研究历史历经起伏，这是因为国际上各个国家对其重视程度的起伏变化对这项研究的持续发展有着重要的影响。第二次世界大战后到 1965 年期间，人们对实现超声速飞行和解决高超声速载人问题的强烈意愿使得可压缩湍流的研究逐渐受到广泛的关注。这些研究目标的实现可以极大促进本领域相关研究的进展，并且显著缩短研究时间。最近，主要受到诸多国家一系列新的重点研究计划的驱使，例如，对高超声速飞行的渴望和对低成本超声速运输航空器的需求，可压缩湍流的研究又进入了一个新的高潮阶段。然而，高超声速飞行计划失败的主要原因是目前仅靠计算流体力学手段还无法设计出任何飞行器，更不用说高超声速飞行器。很多涉及高超声速飞行的相关基础知识还比较缺乏，而且目前的程序在预测转捩、湍流和超声速燃烧问题时还无法获得可靠的结果。想要使高超声速飞行成为现实，高超声速基础研究需要受到广泛的关注。同样，为了使超声速飞行商业化变得有吸引力，在提高燃料燃烧效率、减少污染（特别是臭氧损耗）、减少噪声等方面需要更多新的研究成果。深入理解可压缩效应对湍流的影响，将是解决这些工程领域问题中非常重要的一个环节。

在任何速度条件下，真实飞行器外流场都是一个复杂的流动问题。边界层可能是层流状态也可能是湍流状态，而且层流到湍流的转捩点在飞行包线内变化很大。飞行器表面通常至少在一个方向上是一个曲面，在流线方向表面积是连续变化的，压力梯度在三个方向上也同时存在。因此，飞行器表面会出现三维流动、流动分离以及自由剪切流等现象。飞行器下游和推进系统内通常存在射流、尾迹、混合层等流动现象。这些流动特征之间的相互作用以及与飞行器表面边界层作用形成了极其复杂的流场结构。

当飞行器以很高的速度飞行时，即来流马赫数大于 1，附加的流动效应开始发挥作用。此时动能占流体总能的很大一部分。因此在剪切层内，黏性耗散对平均动能的平衡至关重要。即使在绝热（即不存在向流体的热传递）条件下，剪切层也存在较大的温度梯度。所以，当湍流剪切层在超声速流动中发展时，除平均速度梯度之外还存在平均密度梯度；同时湍流流场还包含了压力、密度和速度的脉动。能量在这些模式中持续传递，因此相比不可压流动条件下，能量的传输机制

更加复杂。在湍流流动的局部区域, 相邻流体运动的相对速度可能是跨声速或者超声速, 局部压缩波和激波会影响湍流的发展。密度取决于压力和温度, 涡量由斜压梯度产生。在大多数实际应用中, 热量传递都不能被忽略, 温度场直接与速度场相互作用。当流动存在压力梯度时, 除了在不可压缩流动中压力梯度产生的流动效应, 流体自身的压缩和膨胀也变得非常重要。也许最重要的是激波的出现, 进而导致流动分离、强烈不稳定流动和局部区域强烈的热传递现象。如果马赫数足够大, 湍流能量可以通过声波辐射进行传递和通过激波进行耗散。

当然, 湍流剪切层的一般行为甚至在亚声速流动中也还没有被完全理解, 而在超声速流动中剪切层的发展要更加复杂。例如, 目前人们对二维不可压缩平板湍流边界层已经进行了较为合理的描述。而在超声速条件下, 发展边界层相似结构的研究才刚刚起步, 其深入程度远未达到不可压缩流动条件下的程度。当然, 针对该问题人们也已经取得了一定的进展。在混合层中压缩率能够严重减小扩散速率, 这暗示了流动结构的重排序。虽然其原因还没有完全清楚, 但人们也提出了几种可能的推测。在湍流运动对强压力梯度的响应中或是湍流运动与激波的相互作用中, 很有可能压缩率对湍流的作用表现得最强烈。然而这些现象无法从不可压缩流动的类比中获得解释。例如, 在可压缩流动中的纵向压力梯度会引起涡管的压缩或膨胀, 从而增加或者减小压力脉动和速度脉动的纵向分量。当壁面流动中存在激波时, 如果激波足够强则会发生分离现象 (该现象能够从亚声速经验中得到解释), 但是强压力梯度可能引起壁面摩擦和热传递的增加 (与亚声速流动相关经验相似)。即使激波强度不足以形成分离, 在激波和湍流之间仍会形成强烈的耦合, 并且可观察到激波的扭曲和非定常运动。理解激波运动和随之产生的非定常热传输以及压力载荷对很多气动问题都非常重要。

从某种意义上说, 人们对流动机理认知的进步可以用流动预测能力来衡量, 然而预测能力是一个相对模糊的概念。一些假定的基本原理可用于描述这些流动物理过程。数值计算是建立在差值近似基础上的, 其计算结果可能很大程度上依赖于经验获得, 且没有任何深入的物理认知。例如, 对于很多复杂的流动结构, 使用简单混合长度或代数涡黏模型也有可能预测出合理的壁面压力、热传输和表面摩擦分布。只要流动没有背离之前的经验, 人们对预测结果在一定程度上是有信心的, 因为在很多方面这些简单模型可以体现数据相关性。与之前相比, 目前人们可以在不使用任何假设模型的条件下对一些低雷诺数流动进行直接数值模拟 (DNS)。因此, 人们可以获得较为完整的三维可压缩非定常流场。然而无论是基于经验的预测方法还是完全 DNS 结果都不能表示人们已经完全理解了流动现象。对于第一种方法, 对流场更进一步的检查通常能够揭示混合长度或者涡黏概念在呈现流场精确数据方面是不充分的, 例如, 平均速率分布或者雷诺应力分布, 这

意味着这些模型不能捕捉到一些流动本质现象。对于第二种方法, DNS 提供了庞大的信息量, 基于这些信息量可以从中寻找相对简单的概念或者模型, 以一种更有组织和更易于理解的形式来呈现这些数据, 这个思路和人们用于解释试验数据的方法完全一致, 但是我们应该意识到试验数据远远少于 DNS 的数据量。

湍流研究的一个根本目的在于: 帮助减少或降低实际流场动力学的复杂度, 从而可以更简单地对流动现象建模, 同时不牺牲任何重要的物理机理。例如, 在湍流中对于拟序结构广泛研究的动力主要在于通过一套小的具有代表性的“事件”也许能够呈现出湍流流场的本质动力学, 人们能够描述这些“事件”的产生—耗散循环, 能理解它们之间的相互作用。正如 Sreenivasan (1989) 提出的“即使是一个高度成功的模型也不能解释所有的细节, 但是一定的适应性和明确的使用范围是评价这类模型的两个重要标准”。

正如在本书第1版序言中所述, 本书的目的是集合在超声速中湍流剪切层方面的一些研究成果, 以及介绍关于我们目前对于这些流动理解方面的一些结论(也就是说发展 Sreenivasan 提到的“模型”)。本书的重点是研究湍流边界层和混合层。考虑了二维和三维边界层, 同时还考虑了激波—边界层相互作用、分离流和具有逆压梯度流动现象。本书的研究内容限制在超声速流动中, 因此不考虑化学反应或者非平衡作用的流动, 且假设流动所涉及的测试气体都是比热为常数的理想气体。

下面讨论可压缩湍流的一些特点, 以便理解接下来可能会遇到的流动现象。在以下4种特殊情况的背景下讨论这些现象: 零压力梯度的平板边界层行为; 基于马赫数的混合层结构; 自由湍流与激波的相互作用; 由压缩角产生的激波—边界层相互作用。最后, 为了达到评估数据所呈现的不确定性和误差的目的, 我们对可压缩流动中湍流的测量技术进行简短的讨论; 还提供了高速流体中定量流动显示方面的无干扰技术的简短说明。

1.2 平板湍流边界层

图1-1显示了两组具有相同雷诺数的空气边界层分布, 一组通过绝热固壁测量得到, 另外一组通过等温固壁测量得到。动量厚度雷诺数 $Re_\theta (= \rho_e U_e \theta / \mu_e)$ 近似为9500, 其中 U_e 是自由流速度, 黏性和密度基于自由来流温度获得。即使是绝热固壁, 空气的温度在接近壁面处明显增加。这是因为在超声速剪切层中由摩擦引起的动能耗散是热量的一个重要来源。因此, 在近壁区域形成了一个低密度高黏性区域。令人惊讶的是, 图1-1中给出的两种流动的速度、温度和质量通量分布十分相似, 即使两种流动的边界条件、马赫数和热传输参数具有较大的差异。事实上, 在外部区域速度分布与 $1/7$ 幂律分布符合良好, 正如在该雷诺数条件下