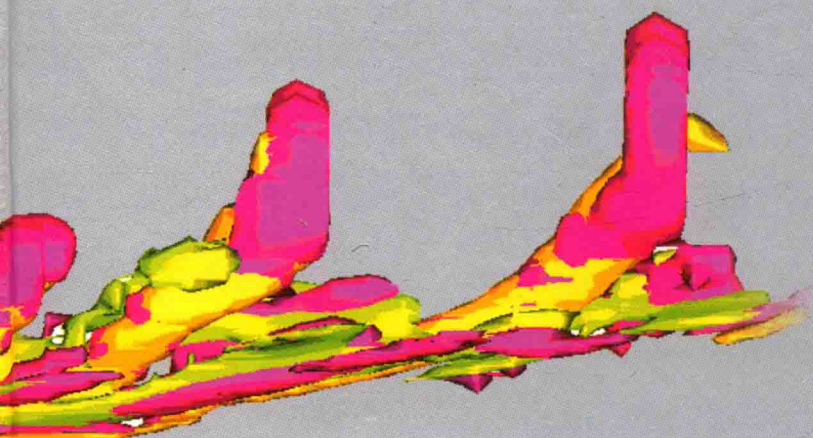


边界层转捩

唐登斌 著

Boundary Layer Transition



科学出版社

边界层转捩

Boundary Layer Transition

唐登斌 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书注重于基础性和实用性研究的结合,总结了在边界层转捩方面的研究工作。主要内容分为三个部分:一是转捩过程,研究各种边界层稳定性问题及边界层转捩的预测;二是转捩机理,研究转捩流场的涡系结构,分析相关物理现象及其演化过程;三是转捩控制,以航空上的实际应用为背景,讨论转捩控制的方法和控制技术的新发展。

本书可作为航空航天、船舶、交通、水利、能源、环境保护及其他与流体力学相关专业的研究生、教师及科研工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

边界层转捩/唐登斌著. —北京:科学出版社,2015.6

ISBN 978-7-03-044795-1

I. ①边… II. ①唐… III. ①边界层转捩-研究 IV. ①O357.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第123701号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:18 1/4 插页:4

字数:356 000

定价:120.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

层流和湍流,是自然界中广泛存在的两种不同流态,有着不同的流动特性。随着两种流态的发现(Reynolds, 1883 年)以及边界层概念的提出(Prandtl, 1904 年),从层流向湍流过渡的边界层转捩问题,实质上就是湍流的起源问题,成了人们长期关注的前沿问题,被认为是经典物理中留下的一大难题,也是现代流体力学中尚未完全解决的重要研究领域。

边界层转捩是一个系统的理论问题,人们通过不同的研究途径和方法,致力于从理论上认识和剖析边界层转捩的复杂过程;转捩问题的研究,又与许多工程设计和应用紧密相关,有助于对转捩进行有效的控制。显然,边界层转捩问题不论是作为基础理论还是工程应用,都引起了人们的广泛兴趣和高度重视。

从流动稳定性开始的转捩问题研究经历了一个很长的发展过程,从早期的线性稳定性理论,发展到分阶段的非线性稳定性理论;所研究的范围也在不断拓展,从不可压缩流到可压缩流、从简单外形到一般三维物体、从边界层到各种剪切流的流动稳定性问题。与此同时,有关转捩的机理性探索 and 实际应用研究,不断地提出新的理论和方法,取得了重大进展。在流动的转捩研究中,边界层转捩问题则是最受关注的。

边界层稳定性和转捩的数值研究,已经发展了许多有效方法,如线性平行流的特征值法,非平行流的多重尺度法,特别是抛物化稳定性方程方法。这个新方法能够同时考虑流动稳定性的非平行性和非线性作用,可以用于外形复杂的物体,且有成为转捩预测新方法的应用前景,这无疑是开辟了稳定性和转捩研究的一条新途径。采用直接数值模拟方法求解 Navier-Stokes 方程,则是边界层转捩研究中的一种最精确的数值方法,可以给出转捩流场的详细信息,能够系统地描述整个转捩过程,特别适用于转捩问题的机理性研究。抛物化稳定性方程方法和直接数值模拟方法都是本书所着重讨论的。

本书主要内容分为有关联的三个部分。一是转捩过程,着重于边界层稳定性问题,包括平行流和非平行流、线性和非线性边界层稳定性,讨论了高速流动、三维气动体的边界层稳定性以及边界层感受性问题。二是转捩机理,基于转捩后阶段流场分析,展示了各种涡系结构的形成和发展,进而剖析转捩流场的物理现象及其所经历的复杂演化过程,直至转变为完全湍流。三是转捩控制,分析影响转捩的主要因素和有效控制途径,着重于在航空上的实际应用,探讨转捩控制技术的新发展。为增强对边界层稳定性和转捩的重要概念的理解和流场特征的阐述,

书中给出了较多的算例和图表,以便于读者的深入分析和研究。

作者长期在航空界工作,一直关注与飞行器的减阻和改进飞行性能等密切相关的边界层问题研究。本书集中了作者的研究小组近些年来在边界层转捩方面的研究工作,其内容主要是以所发表的学术论文和学位论文为基础。研究生王维志、夏浩、朱国祥、张立、成国玮、彭治雨、马前容、刘吉学、郭琳琳、杨颖朝等取得了许多研究成果,尤其是陈林博士对转捩机理、郭欣博士对高速流稳定性,以及博士后郭乃龙对方程椭圆特性、陆昌根对机理分析和赵熙强对孤立波的探讨等研究工作。还要特别指出的是合作指导博士研究生的美国 UTA 刘超群教授,他对转捩机理的分析有独到见解,提出了很多新的认识和观念,对我们很有启示,书中引用了他的一些新观念。

作者感谢曹起鹏教授、沈清研究员、王惠民教授,他们为本书提出了许多宝贵意见;感谢黎先平、李甘牛、顾蕴松、张震宇、史万里等青年学者为本书所做的工作,尤其是夏浩博士的贡献。

限于作者水平,书中难免有疏漏和不当之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 转换引论	1
1.1 转换现象	1
1.2 转换类型	3
1.3 稳定性理论	5
1.4 转换机理	8
1.5 转换控制	8
参考文献	10
第 2 章 线性稳定性理论	13
2.1 引言	13
2.2 Orr-Sommerfeld 方程	14
2.3 特征值问题及其数值解	16
2.3.1 OSE 的全局特征值差分解	17
2.3.2 局部特征值迭代法	19
2.3.3 二维扰动问题	23
2.4 非平行流边界层稳定性	26
2.4.1 非平行流边界层稳定性方程组	26
2.4.2 多重尺度法数值解	27
2.4.3 非平行性影响分析	29
2.5 线性稳定性理论与转换预测的 e^N 方法	31
参考文献	34
第 3 章 抛物化稳定性方程方法	36
3.1 引言	36
3.2 稳定性方程的抛物化处理	36
3.3 扰动增长率表达式	38
3.4 正规化条件	39
3.5 空间推进数值解法	40
3.5.1 差分方法	40
3.5.2 初始条件和边界条件	42
3.5.3 线性 PSE 空间推进算法	44

3.5.4 二维 PSE 数值解	45
3.6 稳定性分析	49
3.7 PSE 方法的优势	51
3.8 PSE 的弱椭圆特性分析	54
3.8.1 弱椭圆特性	55
3.8.2 消除方法	56
3.8.3 解的一致性	57
参考文献	58
第 4 章 非平行流非线性边界层稳定性	61
4.1 引言	61
4.2 二维非线性边界层稳定性	62
4.2.1 二维非线性抛物化稳定性方程	63
4.2.2 初始条件与局部法	64
4.2.3 均流变形与模态分析	66
4.2.4 算法与算例分析	69
4.3 空间演化的二次稳定性	73
4.4 三维非线性边界层稳定性	77
4.4.1 三维非线性抛物化稳定性方程	77
4.4.2 三维模态分析	80
4.4.3 数值方法	81
4.5 H 型三维扰动的非线性稳定性	82
4.6 C 型稳定性分析	85
附录 A 非线性项的完整表达式	87
参考文献	94
第 5 章 高速边界层稳定性	97
5.1 引言	97
5.2 可压缩流边界层方程及基本流参数	98
5.3 可压缩流边界层稳定性	101
5.3.1 扰动方程	101
5.3.2 线性抛物化稳定性方程	102
5.3.3 数值方法	104
5.3.4 非平行流稳定性分析	105
5.4 超/高超声速流的线性边界层稳定性	108
5.4.1 无黏稳定性方程及数值解	108
5.4.2 无黏稳定性与多重模态	111

5.4.3 黏性多重不稳定模态	113
5.5 超/高超声速流的非线性边界层稳定性	117
5.5.1 非线性抛物化稳定性方程	117
5.5.2 NPSE 数值解	118
5.5.3 非线性稳定性分析	119
附录 B 方程(5.10)与式(5.47)展开式	124
参考文献	131
第 6 章 三维气动体可压缩流边界层稳定性	133
6.1 引言	133
6.2 三维可压缩流边界层	135
6.2.1 边界层方程	135
6.2.2 横向分段推进法	137
6.2.3 基本流速度分布	138
6.3 曲线坐标系的三维抛物化稳定性方程	140
6.3.1 Navier-Stokes 方程	140
6.3.2 扰动方程	142
6.3.3 抛物化稳定性方程	143
6.4 数值方法	144
6.5 三维边界层稳定性分析	145
6.6 三维边界层流动的转捩预测	150
6.6.1 转捩位置的预测问题	150
6.6.2 转捩预测的 e^N 方法	150
6.6.3 转捩预测的 DNS 和 PSE 方法	152
附录 C 方程(6.19)展开式	153
参考文献	159
第 7 章 边界层感受性问题	162
7.1 引言	162
7.2 感受性理论	163
7.2.1 自然感受性与强迫感受性	163
7.2.2 前缘感受性理论	164
7.2.3 局部感受性理论	165
7.3 渐近分析法	165
7.3.1 前缘感受性分析	166
7.3.2 渐近 Orr-Sommerfeld 分析	167
7.3.3 结合 PSE 方法	167

7.4 感受性问题的数值模拟	170
7.5 进展与分析	174
参考文献	175
第8章 边界层转换的直接数值模拟方法	178
8.1 引言	178
8.2 守恒形式 N-S 方程	179
8.3 初始条件	179
8.4 方程离散	181
8.4.1 紧致差分格式	181
8.4.2 空间离散	185
8.4.3 滤波函数	185
8.4.4 时间推进	186
8.4.5 离散方法比较	187
8.5 边界条件	188
8.5.1 壁面边界条件	188
8.5.2 入口边界条件	189
8.5.3 展向边界条件	189
8.5.4 特征无反射边界条件	189
8.6 计算网格与并行算法	193
参考文献	197
第9章 转换边界层的典型涡结构	200
9.1 引言	200
9.2 主流向涡和次生流向涡	202
9.3 多种涡结构的形成	207
9.4 环状涡结构分析	211
9.5 K型和H型转换的后阶段涡结构	214
参考文献	216
第10章 转换过程的物理现象	219
10.1 引言	219
10.2 上喷和下扫	220
10.2.1 Λ 涡与一次上喷和下扫	220
10.2.2 环状涡与二次上喷和下扫	222
10.3 负尖峰和正尖峰	224
10.4 高低速条带结构	227
10.4.1 条带形成和演化	227

10.4.2 条带特性分析	229
10.5 高剪切层	230
参考文献	235
第 11 章 边界层转换的后期流场	238
11.1 引言	238
11.2 U 形涡和桶形涡	239
11.3 湍流斑的演化	242
11.4 小涡结构与无序化过程	245
11.5 转换后期湍流形成的新认识	247
11.5.1 湍流形成的经典理论	247
11.5.2 刘超群对湍流形成的新认识	247
参考文献	251
第 12 章 边界层转换控制	255
12.1 引言	255
12.2 影响转换因素	256
12.2.1 压力梯度与物体外形	256
12.2.2 表面粗糙度与壁面温度	258
12.2.3 湍流度与压缩性	260
12.3 转换控制的基本途径	262
12.3.1 改变边界层基本流	262
12.3.2 改变扰动波	265
12.4 转换控制技术的应用	267
12.4.1 转换预测问题	267
12.4.2 NLF 机翼	268
12.4.3 LFC 和 HLFC 机翼	269
12.4.4 LFC 机身	272
12.5 转换、分离与激波	272
12.5.1 分离流转换	272
12.5.2 转换与激波边界层干扰	274
12.5.3 有层流分离的转换点预计	276
12.6 转换控制技术的新发展	277
参考文献	279

第1章 转捩引论

1.1 转捩现象

1883年,雷诺(Reynolds)^[1]第一次在实验中观察到在圆管水流动中存在层流和湍流两种不同的流态,当组合参数 VD/ν (后来定义为雷诺数 Re , V 为平均流速度, D 为管直径, ν 为运动黏性系数) 大于一定值时,流动会从层流转变为湍流。流体运动中的这种流态转变的物理现象称为转捩现象,广泛存在于许多流动问题中。转捩的发生与层流的不稳定性有关,是由于层流失稳导致了流动的转捩。从层流到湍流的极为复杂的转捩过程及研究工作的特别困难^[2],使得这个重大的基础科学问题及其在工程技术上的应用,长期以来一直吸引着人们的高度关注。

层流向湍流的转捩是两种完全不同的流动形态的转变,图 1.1 展示了通过烟流法实验所看到的层流经过格栅后转变为湍流的过程(对应的格栅雷诺数 $Re=1500$)。由图可以清楚地看到两种流态的显著差别,与规则的层流不同,湍流的流态十分紊乱,故又称为“紊流”(日文又名“乱流”)。古人曰:“堆出于岸,流必湍之”(三国·李康“运命论”),说明了湍流是自然界中一种客观存在的流动现象。

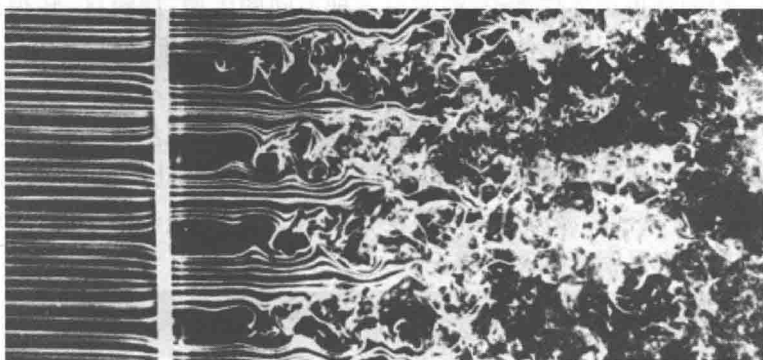


图 1.1 层流经过格栅后向湍流的转变(烟流法显示)^[3]

1904年,Prandtl^[4]提出了边界层(boundary layer, 又称“附面层”)概念以后,人们开始研究边界层的流动特性,分析不同流动形态及其转捩现象。所谓边界层就是流动在物面边界附近所形成的一个黏性薄层(图 1.2),开始于物面的前缘(或者是绕物体流动的前驻点),层内与层外的流动是一种渐近关系而没有确定的分

界线,一般是在层内速度与外部速度相差 1% 的地方,作为边界层的外边界。边界层的厚度随流动不断增长,平板层流边界层的厚度可表为 $\delta(x) \sim \sqrt{\nu x / U_\infty} \sim x / \sqrt{Re}$, 其中, U_∞ 为来流速度, Re 为雷诺数。由于空气、水等流体的运动黏性系数 ν 很小,所以在一般流动中边界层的厚度是很小的(当雷诺数 $Re \rightarrow \infty$ 时,厚度 $\delta(x) \rightarrow 0$)。在边界层内的流动黏性作用十分显著,黏性力项是与惯性力项同量级的,这是因为在很薄的边界层内,速度从物面的 $u=0$ 过渡到外边界的 $u=U_e$, 导致速度梯度 $\partial u / \partial y$ 及其黏性力很大,特别是在物面附近。在边界层之外,黏性影响可以忽略而看成是理想流体流动。

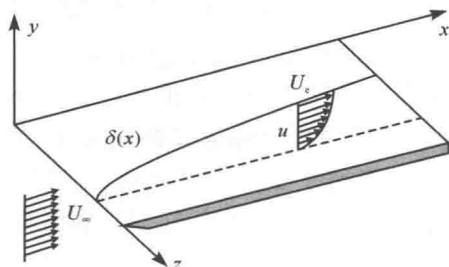


图 1.2 平板边界层流动示意图

在通常研究的剪切流动中,包括边界层流、平面 Poiseuille 流及各种自由剪切流等,它们的流动转捩有许多共同特性,本书着重讨论相对较复杂的边界层的流动转捩,也可以供其他流动的研究作参考。

对于一般的转捩边界层来说,通常有三种不同的区域:层流区、转捩过渡区及湍流区。图 1.3 是采用阴影法显示的实验结果(超声速来流马赫数为 $Ma=3.0$),清晰地展示了三维旋成体边界层流动的三个区域。如图所示,随着流动向下游的发展,边界层厚度在不断增加,边界层内的流动也由规则逐步变为紊乱,尤其是在湍流区。通过这个边界层侧视图可以看到,与物体长度相比,边界层厚度的确是很薄的;若与图中的前缘激波很薄的厚度相比,它同样也是非常小的,这就进一步佐证了边界层厚度是很薄的真实情况。



图 1.3 三维边界层从层流到湍流的过渡(阴影法显示)^[5]

边界层转捩现象的另一个重要标识,就是在边界层转捩区中,流向速度沿法向分布(常称为速度型,或者速度剖面)的显著改变。图 1.4 是在平板边界层转捩区中测得的不同流向位置的速度型^[6](这里的横向和纵向坐标分别为无量纲速度以及离壁面的高度)。在图中,“1 层流”是 Blasius 层流边界层速度型,“2 湍流”是湍流边界层($1/7$ 幂次律)速度型,层流边界层对应于较小雷诺数(位置靠前),湍流边界层对应于较大雷诺数(位置靠后)。边界层的速度型曲线显示了两种流态的不同特性,尤其是在壁面处速度的法向梯度,湍流要比层流大得多。由于壁面摩擦阻力直接与该梯度成正比,这就意味着湍流的摩擦阻力更大。研究表明,在转捩区不同位置处速度型的变化,是与流动的稳定性特性及其转捩过程密切相关的^[6,7]。

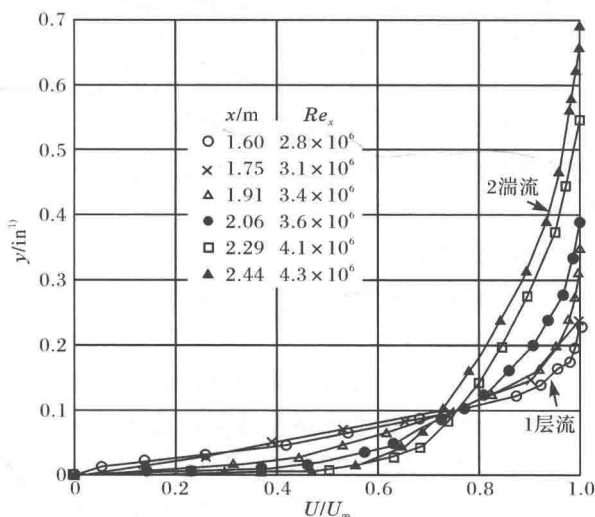


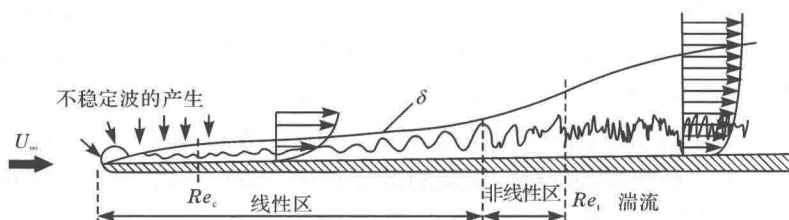
图 1.4 平板边界层转捩区的速度型

1.2 转捩类型

从层流到湍流的边界层转捩,通常是由扰动引起的,是扰动随时间和空间演化的结果。转捩的类型主要与初始扰动有关,其过程也有不同^[8,9]。一般来说,对于初始扰动较小的边界层流动,不断增长的扰动波经历了线性和非线性阶段的发展和演化,从层流到湍流的转捩过程(图 1.5)大致如下。

开始是外界的扰动进入边界层,产生不稳定扰动波。然后是扰动波在向下游传播过程中不断增长,起始阶段的扰动振幅很小,且各自独立演化,常称为“线性

1) $\ln = 2.54 \text{ cm}$ 。

图 1.5 边界层从层流到湍流的转捩过程概图^[10]

稳定性阶段”，可以忽略扰动的高阶小量，用线性稳定性理论来描述。这样的线性近似使得该理论仅能用于转捩的前期阶段。随着扰动的进一步增长，当扰动振幅达到一定值时（如自由流速度的 1% 的量级），需要考虑扰动波之间的相互影响，非线性作用已经不能再忽略不计了，此时流动进入“非线性阶段”。初期的非线性阶段常称为弱非线性阶段，在这个阶段中，各种不同频率和波数的特征扰动模态的相互作用（尤其是那些共振模态）已经较强，并能迅速放大，形成广泛频率谱的三维不稳定波。经过弱非线性阶段后的扰动继续增长，进入了边界层转捩的后阶段（又称为强非线性阶段，或实质非线性阶段），主要特征是各种复杂涡结构的形成和发展^[11,12]，并逐步向湍流过渡。

研究表明，环境扰动和基本流的特性能够影响转捩的过程，根据目前的理论，转捩的类型大致分为：

自然转捩（natural transition，或称正常转捩，常规转捩），一般出现在背景扰动较低的情况^[8,13]。通过初始小扰动在层流边界层中激发形成 Tollmien-Schlichting 波（T-S 波），而后经过线性放大和非线性演化，形成如图 1.6(a) 所示的三维扰动波、不同涡系结构、强剪切层和湍流斑等，最终演变成湍流。转捩的扰动引入形式可以是自然扰动，也可以是人工扰动。在实验研究中，常用人工小扰动形式，如用振动带、声波或狭缝射流等产生扰动波。绝大多数的转捩属于自然转捩，也是书中关注的重点和主要研究对象。

旁路转捩（bypass transition，或称强迫转捩，“逾越”型转捩）。Klebanoff 等^[13]在边界层转捩实验中，观察到只要初始扰动足够大，自然转捩中的线性阶段被跳过，边界层扰动出现突变式的增长，而没有出现特征模态的增长方式，这样的转捩称为旁路转捩。这种转捩的初始阶段与自然转捩的不稳定性增长有显著的区别，一般是背景湍流度（如自由流扰动、粗糙表面等）较高的流动，常常归结为这种转捩类型^[14,15]。为方便比较，在图 1.6 中分别展示了在低/高自由流湍流度（ Tu ）情况下的平板边界层的转捩过程。显然，高湍流度与通常的低湍流度情况有很大差别，它跳过了线性阶段，经过（Ⅰ）自由流局部涡扰动形成条纹、（Ⅱ）初期湍流斑的出现及（Ⅲ）湍流斑的聚合等阶段，最后完成层流向湍流的转捩[图 1.6(b)]。

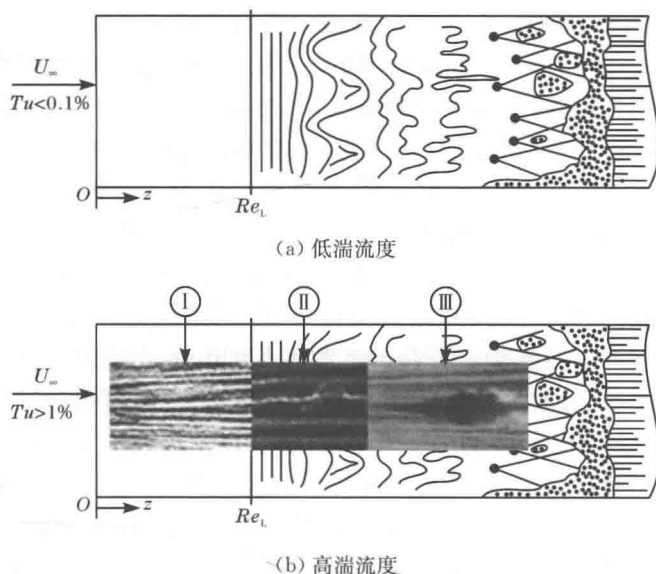


图 1.6 不同自由流湍流度的平板边界层转捩过程比较^[16]

此外,在转捩中存在的**斜波转捩**(oblique wave transition)现象,也有将其单独归结为另一类转捩。Schmid 等^[17]通过直接数值模拟方法首次研究在槽道流动中由一对斜波模态作为初始激励的转捩过程,在开始时没有加入、在过程中也没有观测到二维 T-S 波扰动。Berlin 等^[18,19]进行了边界层的斜波转捩研究,展示了斜波转捩中的一些涡系结构的形成和演化。Wu 等^[20]详细研究了一对斜波从线性到非线性的各个阶段,并分析引起转捩的演化过程。

需要指出的是,不同于从光滑壁面观察到的结果,若表面十分粗糙,也可能是直接转捩,而不出现湍流斑;若流动遇到较强的逆压梯度,或是存在某种分离的情况下,也可能会缺少自然转捩过程中的某些阶段。

1.3 稳定性理论

一个多世纪以来,流动稳定性的研究经历了很长的发展过程,转捩开始于不稳定扰动波幅值的增长,从线性稳定性(包括平行流与非平行流)到非线性稳定性,形成了比较系统的理论^[21]。

1. 线性平行流稳定性

从层流向湍流转捩的发生是由基本流场中早期的不稳定性引起的,与流动中很小的、有时也是不确定的扰动有关,这就产生了稳定性理论的基本思想:从一种

流动形态转变为另一种形态,是原先流动中所出现的扰动自然演化的结果,导致了波扰动的放大和最终的层流溃变。历史上关于稳定性和转捩研究的成功和不成功的理论模型是很多的,现在用来研究稳定性的大多数模型是基于 Prandtl 假设:转捩是由小扰动放大引发的。假如流动使小扰动逐渐减弱并最终消失,流动恢复到原状态,那么该流动就是稳定的;反之如果该扰动逐渐增长,并不能恢复到原状态,则流动是不稳定的。因此,“稳定性”被定义为对抗小扰动的性质。最初, Orr 和 Sommerfeld 分别用平行平板间的流动(流线相互平行)模拟二维波的放大过程,并假设波的振幅很小而忽略非线性项,控制方程简化为常微分方程,称为 Orr-Sommerfeld 方程(OSE)。Tollmien 和 Schlichting 在边界层稳定性计算方面做了开创性工作,先后通过求解 OSE 及其在稳定性分析中取得了突破,计算了平行流(忽略边界层缓慢增长)的中性稳定性曲线,以及包括中性曲线点之间的增长率。因此,上述分析中的二维波就被称为 T-S 波。但是仍然有很多人对稳定性理论持怀疑态度,直到 Schubauer 和 Skramstad^[22]进行的风洞实验,揭示了转捩中不稳定波的测定规律,这是第一次对 Tollmien 的理论预言进行的实验验证,得到基本一致的结果(鉴于他们所做的贡献, Morkovin^[23]建议 T-S 符号代表 Tollmien-Schlichting, Schubauer 和 Skramstad)。

线性稳定性理论从不可压缩流扩展到可压缩流问题,在 20 世纪四五十年代就已取得了成功,随着计算机的广泛应用,能够得到可压缩线性稳定性方程的精确解。其中, Mack^[24,25]作出很大贡献,他探讨了线性稳定性的许多未知领域,特别是高马赫数时的各种模态,所发现的高阶模态,在不可压缩流中是没有相对应的,现在称其为 Mack 模态。

2. 线性非平行流稳定性

Gaster^[26]通过直接求解 OSE 以获得空间增长率,并给出空间与时间增长率的关系。然而,实验与理论的结果在较低雷诺数等情况并不吻合,使得人们开始怀疑 OSE 理论的平行性近似假设的局限性。将边界层流动当做平行流处理是基于这样的前提之下,即认为边界层的流向尺度远大于 T-S 波的波长。实际上,这对于靠近前缘或者边界层厚度变化激烈的区域来说是有疑问的,此时认为在边界层中所有位置上都具有相同增长率的平行流结果,显然是不准确的。因此,非平行性对稳定性的影响是需要考虑的。Bouthier^[27]采用多重尺度(摄动)技术,在分析线性边界层稳定性时,考虑了主流的非平行性,随后又有许多的研究和探讨^[28],得到了非平行作用的可靠修正结果。

3. 非线性稳定性

由于线性稳定性理论还远不能解决转捩问题,所以需要进一步研究非线性稳

定性问题。Landau^[29]对于在线性阶段之后的流动演化可能导致转捩,进行了理论探讨,认为振幅随时间的演化,应当受到振幅自身大小的控制,并推测小振幅初始不稳定扰动不会随时间无限地增长,而在某个有限振幅时达到一个平衡条件。Stuart^[30]把 Landau 的设想形成具体的理论,进一步把扰动的放大率作为小展开参数,从 Navier-Stokes(N-S)方程正式导出 Landau 方程,提出著名的弱非线性理论。但是这一理论存在一定缺陷。Herbert^[31]改进了推导中局限于中性点邻域的限制,周恒^[32]指出在处理平均流修正方法等问题时,需要对弱非线性理论进一步改进。Klebanoff 等^[13]的实验及其他研究^[33],证实了放大的 T-S 波会形成不同的三维结构,发现在转捩过程中存在一些重要的非线性现象。后来采用新的理论模型来解释,例如,引进基于 Floquet 理论的二次稳定性(又称二次失稳)分析,指出亚谐波模态的存在。

直接求解 N-S 方程的数值计算也取得很大成功,例如,Case^[34]在增长的边界层中得到了二维解,Orszag 等^[35]获得具有周期边界条件的三维结果。Crouch 等^[36]对 T-S 波发展为三维后的非线性阶段的理论分析,结合 Landau 振幅展开式和基于 Floquet 理论的二次稳定性理论,详细研究转捩流动的各种模态之间的相互作用。目前已经有很多方法可以用于非线性问题的处理和研究,特别是,Herbert 等^[37]通过分解扰动波和利用流向慢变特性,略去流向上扰动导数的高阶小量,导出抛物化稳定性方程(parabolized stability equation, PSE)。由于 PSE 对扰动幅值没有作任何假设和限制,所以比较容易向非线性稳定性分析作拓展。因此 PSE 方法既能够很好地处理非平行问题,又可以同时考虑非线性作用^[38]。Smith^[39]采用三层理论也能同时考虑非平行项和非线性项,这是在雷诺数趋于无穷时的一种有效渐近方法,但是从无限到有限雷诺数的结果转换,直接影响到实际的应用。需要指出的是,当扰动波发展到二次失稳后,幅值增长很快的三维扰动波向湍流的转捩,有着不同的路径,分别称为 K 型(Klebanoff^[13])、H 型(Herbert^[40])和 C 型(Craik^[41])。

4. 感受性问题

我们注意到,在图 1.5 中最左边的“不稳定波的产生”,就是外部扰动在边界层内流场产生不稳定波的问题。实际上,外部扰动进入而产生边界层内不稳定波的过程,就是边界层对外部扰动的感受性(receptivity,又称接受性)问题^[42,43]。这是边界层稳定性研究中相对较迟才引起人们重视的一个新问题,主要是研究边界层中初始扰动的来源,分析外界的扰动激起边界层内 T-S 扰动波的转化过程。在第 7 章中将讨论这些问题。

流动稳定性理论是转捩研究中的重要内容,尤其是非线性稳定性理论的发展,为理解流动转捩过程中产生的许多相干结构(coherent structure,又称拟序结构)提供