

中国科学院工程热物理研究所

工学博士学位论文

第一部分:

转捩流动的数值方法研究

博士研究生: 徐星仲

导 师: 蔡睿贤研究员

蒋洪德研究员

申请学位级别: 工学博士

学 科: 热力叶轮机械

培 养 单 位: 中国科学院工程热物理研究所

一九九六年五月

中国科学院工程热物理研究所

工学博士学位论文

第一部分：

转捩流动的数值方法研究

博士研究生：徐星仲

导 师：蔡睿贤研究员

蒋洪德研究员

申请学位级别：工学博士

学 科：热力叶轮机机械

培 养 单 位：中国科学院工程热物理研究所

一九九六年五月

Chinese Academy of Sciences
Institute of Engineering Thermophysics
Ph. D. Dissertation

Part 1 :

**Numerical Investigation into Transitional
Flows**

Ph. D. Candidate :	Hsiu Hsingchong
Supervisor :	Prof. Cai Ruixian Prof. Jiang Hongde
Academic Degree Applied for :	Doctor of Engineering
Speciality :	Thermoturbomachinery
Unit of Degree Conferred :	Institute of Engineering Thermophysics , Chinese Academy of Sciences

May , 1996

致 谢

首先感谢先师吴仲华先生，是他将我引入科学研究之门。

本文是在导师蔡睿贤研究员和蒋洪德研究员的悉心指导和亲切关怀下完成的。

在此谨向三位导师表示衷心的感谢。他们的为人、为师、为学者的严谨作风将使作者终生受益。

在论文工作过程中，朱斌副研究员给予了极大的帮助，还与黄伟光副研究员进行了多方面有益的探讨，在此表示深深感谢。

同时还感谢工程热物理所平面叶栅风洞的余滨副研究员、谭春青副研究员，航空工业总公司六二四研究所三〇五实验室的仲永兴研究员、姜正礼实验师，哈尔滨工业大学动力工程系的王仲奇教授、徐文远教授，他们为本文提供了各方面宝贵的实验数据。

郭朝阳、蔡虎、刘海涛等同志和何咏梅女士在论文打字和贴图方面给予了无私的帮助，在此一并表示感谢。

最后深深感谢我的父母和家人。

摘 要

转捩区流动的复杂性增加了对转捩模拟的困难，目前在世界上只有少数几种湍流模型具备对转捩流动的模拟能力，而这些模型对不同流动场合的适应性并不都很令人满意。本文作者基于对转捩区流动机理和特征的充分认识，在原有形式 k 方程基础上，通过精心构筑 F_μ 函数，建立了一个新的 k 方程转捩湍流模型；对比平板零压力梯度大跨度来流湍流度情况下转捩边界层的测量结果，该模型准确地预测了转捩区起点、终点位置，并且模拟出了转捩区内湍动能 k 峰值高于转捩完成后完全湍流区相应值这一重要物理现象；计算中通过设置通道上边界为无粘平板，巧妙回避了模拟平板有压力梯度转捩流动时将会遇到的困难；对两种来流湍流度情况下四种不同压力梯度平板转捩流动的模拟，定性反映出了在不同来流湍流度情况下压力梯度对转捩起点位置影响的特征；同时，采用本文模型分析了壁面不同热交换强度对转捩流动的影响，在来流中等湍流度以下时给出了定性正确的结果，在高来流湍流度情形时模型计算给出了新的现象。通过比较得出，本文新建立的转捩湍流模型应该说是目前对转捩流动模拟能力较为准确、且对不同流动场合适应性较强的一个模型。

Abstract

Both physical and numerical complexity of transitional flow hinder the development of transition turbulence modeling. Few turbulence models capable of transitional flow modeling is available. By using a new function F_μ , which is constructed elaborately to include more physical characteristics of transition phenomena, a new k-equation turbulence model is proposed in this paper. A series numerical tests of 2D-NS solver coupling with the present model are carried out by the author to identify its capability of transitional flow modeling. The comparison of the numerical solution with experimental data and well-known correlations show a very promising result. In the case of zero pressure gradient, the start and the end of transition zone are correctly forecast and an overshoot of turbulence kinetic energy profile within transitional boundary layer is well modeled. Under adverse and favorable pressure gradient, the delay or promote of transition caused by different pressure gradient is also predicted well. For heated/cooled transitional flows, a quality-correctly numerical results are obtained. The above-mentioned results show that the present turbulence model can be used for transitional flow prediction in a wide range of flow conditions.

目 录

摘要

Abstract

第一章	转捩基本现象和转捩研究的现状	1
§ 1	转捩基本现象及研究转捩的意义	1
	1.1 转捩基本现象和转捩基本概念	1
	1.2 转捩区流动特征及研究转捩的意义	4
	1.3 叶轮机内部流动的转捩现象	5
§ 2	转捩边界层实验研究现状	8
	2.1 平板自然转捩边界层	8
	2.2 湍流斑生成的研究	12
	2.3 来流湍流度对转捩的影响	14
	2.4 压力梯度对转捩的影响	15
	2.5 壁面曲率对转捩的影响	17
	2.6 其它因素影响下的转捩过程	19
	2.7 叶栅流动中转捩实验研究现状	21
§ 3	转捩边界层理论研究现状	26
	3.1 零方程模型(即转捩经验准则)	26
	3.2 单方程和双方程转捩湍流模型	28
	3.3 $K-\varepsilon-\gamma$ 转捩计算方法	32
§ 4	本文研究内容	34
第二章	k 方程转捩湍流模型	35
§ 1	k 方程湍流模型模拟转捩现象的思路	35
	1.1 充分发展湍流的 k 方程湍流模型	35
	1.2 模拟转捩的思路	37
§ 2	F_μ 函数	38
	2.1 Jiang、Birch 的两种 F_μ 函数形式	38
	2.2 一个新的 F_μ 函数	39
§ 3	湍流混合长度尺度 L 外层关系的选择	43
第三章	NS 方程求解转捩流动数值方法简介	45
§ 1	数值方法简介	45
§ 2	计算区域及网格	48

第四章	来流湍流度对平板转捩过程影响的数值模拟	51
§ 1	概述	51
§ 2	T3A 问题	52
§ 3	中等来流 $Tu_{\infty}(=1.25\%)$ 情况	53
§ 4	低 $Tu_{\infty}(=0.1\%)$ 和高 $Tu_{\infty}(=5\%)$ 情况	57
§ 5	来流湍流度对转捩过程影响的模拟	61
§ 6	小结	64
第五章	压力梯度对平板转捩过程影响的数值模拟	65
§ 1	概述	65
§ 2	算例中平板上压力梯度的形成方法	66
§ 3	压力梯度对平板转捩流动影响的数值模拟	67
§ 4	小结	69
第六章	壁面在热交换时转捩流动特征的数值研究	71
§ 1	概述	71
§ 2	加热平板	72
§ 3	冷却平板	75
§ 4	小结	79
第七章	总结	81
参考文献		83

第一章 转捩基本现象和转捩研究的现状

§ 1、转捩基本现象及研究转捩的意义

1.1、转捩基本现象和基本概念

早在1880年，Reynolds, O. 著名的染色液实验第一次让人们直观地观察到了流动由层流状态发展到湍流状态的转捩过程。紧接着他给出了圆管流的转捩雷诺数在1900~2000之间。可以说正是从那时起，粘性流动中转捩这一复杂而重要的现象开始受到极大的关注，一方面因为转捩区流动直接关系着湍流起源问题，另一方面因为该区中的流动特征直接影响着流体机械的动力和传热特性。一百多年来，许多研究者致力于弄清楚这一引人注目的现象，做了大量的理论和实验工作，但是因为其固有的复杂性——是一个具有强烈的非定常、非线性、对干扰极其敏感的三维过程，因此可以说，直到今天，对转捩现象的认识还远远不够成熟。

早期的工作大量集中于外流边界层自然转捩。在这一过程中边界层的特征参数和流场内部结构存在着明显不同于层流或湍流的特征，图1.1^[95]给出平板边界层自然转捩过程各阶段流场内部结构示意图

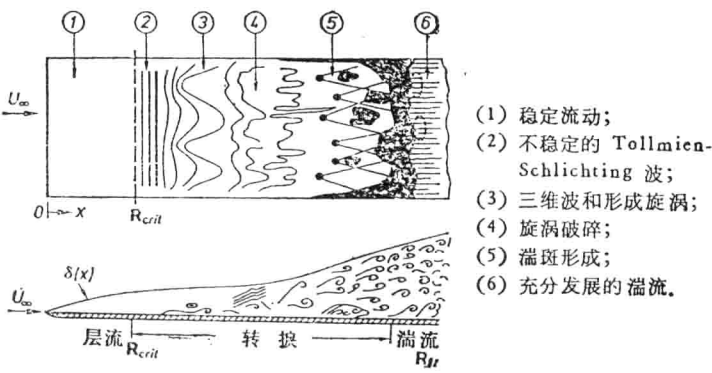


图1.1 平板边界层自然转捩过程各阶段流场内部结构示意图

一般认为，这一转捩过程是由二维 Tollmien-Schlichting 波非线性发展成三维有限扰动从而导致湍流生成。其后，许多研究者在其它情况下发现了不同的转捩现象。就目前的认识程度，转捩机制可分为如下三种基本模式：

I) 自然转捩 (natural transition)

这种模式下可明显观测到 Tollmien-Schlichting 波生成、发展过程。

ii) 旁路转捩 (bypass transition)

该模式转捩过程受其它流场因素控制，诸如压力梯度等等。在转捩发生时 Tollmien-Schlichting 波还很微弱或者根本没有生成。这是一种最复杂的转捩模式，大多数有关的研究工作都集中在这里。

iii) 分离泡转捩 (Seperation bubble trasition)

这种模式最大的特点是有层流分离现象出现。

这三种模式的转捩并不相互独立，通常的真实流动情况下，往往出现多种模式转捩过程并存现象。

为了充分描述各种转捩过程的流动特征，除引用已有的一些衍生于层流、湍流的概念外，人们还另外引进了如下一些主要概念：

i. 湍流斑 (turbulent spot)

湍流斑概念最早由 Emmons^[24] 在1951年提出，其后这一概念被广泛地用于描述各种模式转捩区湍流生成。图1.2^[23] 为湍流斑的基本形态及运动过程。

关于湍流斑生成典型的观点认为^[96]：边界层内初始小扰动发展成二维 Tollmien-Schlichting 波，不稳定的 Tollmien-Schlichting 波由于非线性作用演变成三维扰动并快速增长，导致层流状态崩溃，在局部形成剧烈的不稳定区域即湍流斑，湍流斑的不断生成和堆积最终使流动变成完全湍流状态。

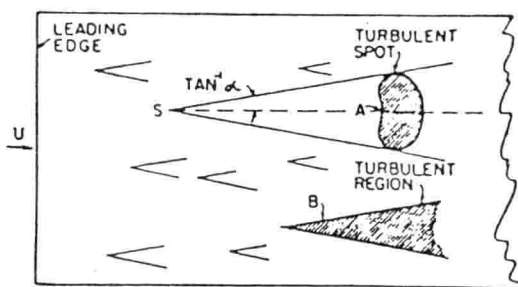


图1.2 湍流斑示意图

ii. 逆转捩 (re-laminization)

这是一种流动由紊乱的湍流状态转变为有序状态现象，多发生在加速因子较大区域。在叶轮机械中一般出现在压力面后部。逆转捩过程后流动并不是完全变成层流，只是间歇因子有不同程度的下降。这种现象目前还并不多见，但值得引起重视。

iii. 尾迹诱导转捩 (wake-induced transition)

这种型式的转捩普遍存在于叶轮机械中，是由上游叶片排周期性脱落的尾迹引起的，该尾迹湍流在边界层内以大约0.7倍于外流速度向下游流动。从本质上讲，它属于具有非定常周期性特征的旁路转捩模式。

iv. 转捩区间歇因子 γ (intermittency)

在充分发展湍流边界中，间歇因子 γ 定义为边界层外层湍流的时间或空间间歇性，而在转捩区中，则定义为当地转捩边界层剖面内流动在湍流与层流混合背景上的间歇性。通常，转捩边界层内某一参数 C_r 值如下确定：

$$C_r = (1 - \gamma) C_l + \gamma C_t$$

式中， C_l 、 C_t 分别为参数 C 的层流、湍流值。

v. 转捩起点、终点及转捩长度

由于从层流发展到转捩是一个渐变过程，因此转捩起点很难有一个确切的定义。目前被各文献使用的定义主要有如下几种^[4]：

- a) 将湍流区边界层厚度向上游外推插值，0厚度点即为转捩起点；
- b) 壁面摩擦系数 C_f 最小点；
- c) 靠近壁面某处间歇因子等于预先给定的一个较小值(如0.1)点；
- d) 靠近壁面某处流向最小动压 (dynamic pressure) 点；
- e) 形状因子偏离层流值 2.6 处；
- f) 边界层中稳定脉动开始被破坏处；
- g) 第一个湍流斑出现处；

目前，最多被使用的定义是b)、c)两种，而且可以预想，当考虑复杂情况下、复杂边界上的流动时，定义c)也许是最适合于转捩模拟的。

关于轉換終點，一般均採用 C_f 最大值處或當間歇因子 γ 接近於1.0處來定義，此時，邊界層速度剖面呈現完全湍流特性。

當轉換起點、終點位置確定後，轉換區長度即可求得。

1.2、轉換區流動特征及研究轉換的意義

前面已經述及，轉換邊界層中特征參數有着明顯不同於層流或湍流的特征。以平板自然轉換為例，圖1.3給出了層流、轉換、湍流各區域邊界層動量厚度、型狀因子和壁面 C_f 和 S_t 數示意圖。由圖可見，當轉換過程開始時，邊界層厚度、 C_f 、 S_t 值都由層流值明顯增加。在轉換結束處，流動變成充分發展的湍流， C_f 、 S_t 達到極大值，在整個轉換過程中，形狀因子由層流狀態值約2.6減少到湍流狀態值約1.4。轉換流動的這些特征直接影響着流體機械的動力、傳熱特性，因此引起了人們極大的興趣。通過有效地控制轉換起點、轉換區長度，可以大大地改善流動效率，提高設計水平。在外流方面已成功的範例為，通過預測機翼邊界層流動，採用有效的控制手段已設計出層流機翼，使阻力大幅度下降；在內流方面，葉型“後部加載”概念正在逐步成為一種新的設計思想；而在傳熱方面的研究工作正在為工作在高溫條件下燃氣透平的冷卻負荷分布提供有意義的參考。影響轉換的因素很多，主要有自由來流湍流度、壓力梯度、壁面曲率，其它還有如：來流雷諾數、馬赫數、

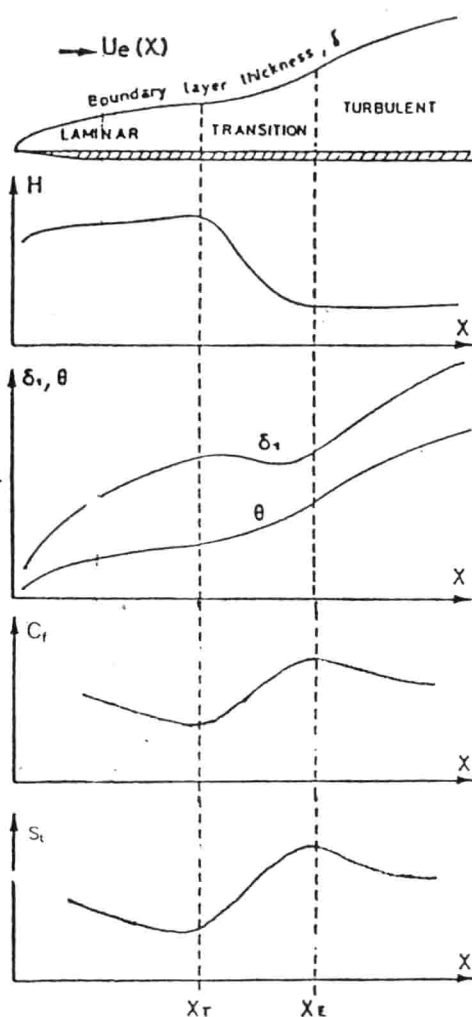


圖1.3 轉換區流場參數特征

表面粗糙度、声波、加热冷却、抽气吸气、上游流动历史等等，诸多的影响因素虽增加了转捩过程研究的难度，但同时也为有效地控制转捩提供了丰富的手段。前面提到的层流机翼的研制即是通过在前缘抽吸边界层的方法得到的。

1.3、叶轮机内部流动中的转捩现象

当开始研究叶栅机械内部流动中转捩过程的时候，我们首先必须回答一个问题：在叶轮机内部那样复杂的流动条件下，叶栅表面是否存在转捩过程？虽然没有真实叶轮机运行条件下叶栅表面参数测量的结果，但目前在实验室条件下获得的大量可靠结果证明了叶栅表面存在转捩现象，因此大多数学者对此都持肯定的态度。我们在这里不妨作一个简单的分析。

影响叶栅内流边界层的主要因素有：压力梯度、来流湍流度、壁面曲率及来流弦长雷诺数。其中，压力梯度、壁面曲率在不引起流动分离的情况下只是起到助长或削弱转捩发展的作用，并不从根本上消除转捩的发生，决定转捩是否发生的因素为来流湍流度和弦长雷诺数。对导致转捩发生的雷诺数 Re_x 临界值，一个粗略的、被广泛接受的值为 3.5×10^5 ；同时实验发现^[8]，在来流湍流度高至10%以上时，叶片表面还存在有转捩现象。图1.4给出了典型燃气轮机工作时的弦长雷诺数范围（文献[46] [94]），可以看出，大部分燃气轮机都工作在转捩发生的区域；蒸汽轮机以国产200MW机组为例，我们计算得出：机组实际运行条件下高压缸雷诺数范围为 10^{6-7} ，中压缸雷诺数范围为 10^{5-6} ，若仍以上面的准则为标准，则可以认为在中压缸末几级和低压缸全部级的叶片表面将有转捩发生。

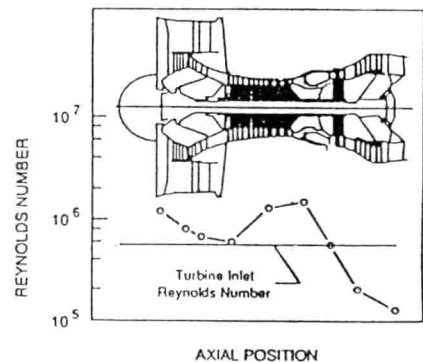


图1.4 典型燃气轮机弦长雷诺数

许多学者的实验结果说明，在叶轮机中，转捩并非特殊现象，而是普遍存在的过程，而且在一些情况下，转捩长度可覆盖一半以上的叶片表面^[8]，有时转捩甚至延伸至叶片的尾缘而不存在充分发展的湍流区，而且，复杂的

流场条件也决定了转捩模式的多样性及多种模式并存。一般来说，叶轮机械内流中有如下几种转捩现象^[94]：

a) 自然转捩：

这种模式发生在低来流湍流度情况下，因此，除可能存在于低压压气机或风扇入口叶片排外，此种转捩在叶轮机械中并不多见；

b) 旁路转捩：

因叶轮机械内部流动主流区湍流度通常都较高，且在压气机中又有较强的逆压梯度，所以这种模式的转捩在叶轮机械内部流场中普遍存在；

c) 分离泡转捩：

这种型式的转捩通常在叶片头部发生，而且在进口气流存在攻角时更易发生；

d) 逆转捩：

产生这种模式转捩的前提条件是存在顺压梯度，因此通常存在于透平叶片压力面后部，有时在压力面也可能发生，这种现象并不多见；

e) 尾迹诱导转捩：

这也是叶栅流动中普遍存在的转捩模式，它是一种周期性非定常过程，近来正越来越多地受到重视^{[21][47]}。

最近的实验^[80]结果还表明，在叶片压力面前部因存在 Taylor - Gortler 涡，可能存在着受其它基理控制的转捩过程。

图15 示意出一个涡轮叶片的表面可能存在着的多种转捩模式。前面已经提到，转捩区内边界层的摩擦系数与层流或湍流区有着极大差别，在较早甚至直至今日，大部分叶栅流场湍流模型都还不具备模拟转捩流动的能力，或者只是使用了一些简单模型，如 B-L 湍流模型的点转捩^[4]，这样一些简单的手段远远不能正确反映叶片表面真实流动情况，而这是正确计算叶片气动损失和传热特性的前提，文献[94]对叶轮机械内部流动中转捩的意义作了深刻的详述：“研究叶轮机械中转捩现象是叶栅优化设计的主要内容”，“对压气机中转捩现象进行研究的目的是为了降低设计工况下的损失，而且要改善偏离设计工况时的性能，从而增加非设计工况下的工作范围”，“对于透平叶栅，由于湍流热传导要强烈三到五倍，预测转捩可更准确地计算叶片表面的热负荷分布，以保证足够的冷却，

但又不致于由于过多的冷却气流使透平效率大大降低，同时，也能正确计算透平叶片的气动损失”。

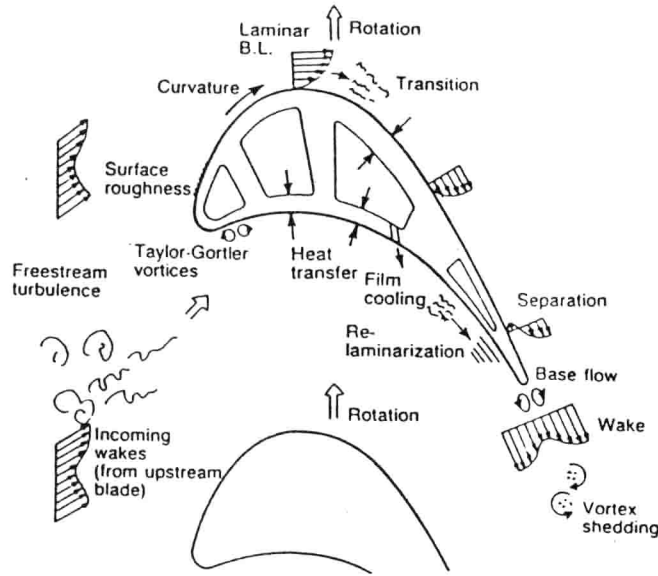


图5 叶片表面复杂的流动状态
及可能存在的转换模式

§ 2、轉換边界层实验研究現狀

2.1、平板自然轉換边界层

尽管早在1880年 Reynolds, O. 的染色液实验就已清楚显示了流动从层流状态到湍流状态的转换过程, 但由于受实验条件和测量手段的限制, 很长一段时间内, 转换实验研究没有取得多少进展, 直到本世纪中期, Klebanoff & Schubauer 等人的一系列实验^{[39][40]}才重又使转换现象成为研究的重点。他们的实验虽然是在零压力梯度光滑平板上进行的自然转换过程的测量, 没有考虑别的因素的影响, 但因为这对认识转换过程机理及了解转换过程特征有着深刻的意义, 因此他们的许多实验结果直至今天仍被广泛引用着。

Klebanoff 等人详细测量了很低来流湍流度、零压力梯度情况下平板自然转换边界层参数, 尽管实验平面进行了精心加工以尽量保证展向均匀性, 但是在层流段对扰动速度 u' 的测量还是显示了强烈的展向—流向二维特征(图 1.6), 并且随着主流向下游推移, u' 的振幅不

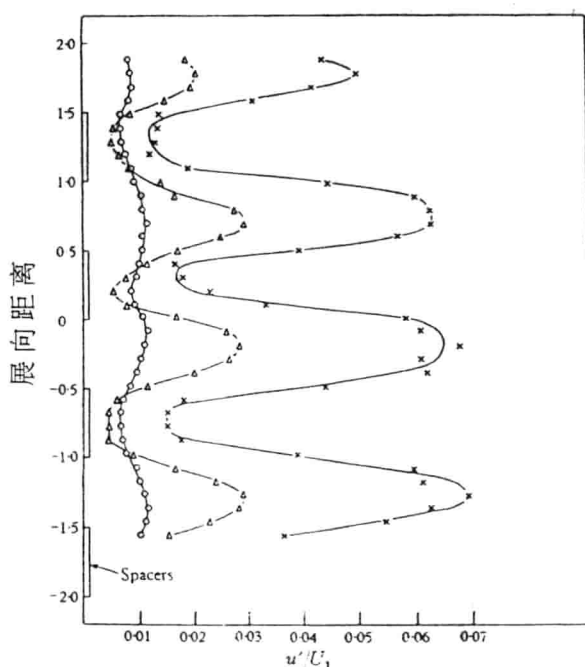


图1.6 平板层流段扰动速度 u' 呈现峰-谷结构

断加大, 形成明显的 Tollmien - Schlichting 波特征, 而且, Ross 等人^[63]的实验结果和 Jordison 的计算结果^[34]都显示: 沿壁面法向在边界层内存在 u' 振幅的零点, 此点两侧扰动速度相位相差 180° 。图 1.7 为在一个

Tollmien-Schlichting 波长范围内扰动速度 u' 展向峰值处瞬时速度剖面图 (Nishioka et al^[53])，很显然，在瞬时速度的内凹处形成一个局部强剪切区，局部剪切层的进一步发展就会形成更复杂的“发卡漩涡” (hairpin eddies)，从而导致局部湍流区即湍流斑生成，边界层层流结构因此而崩溃，局部流动进入湍流区域。

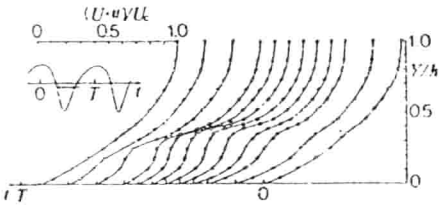


图1.7 瞬时速度($U+u'$)在一个TS波周期内的变化

在转捩区中，通过对扰动速度 u' 的测量，Klebanoff 等人发现了转捩边界层流动中的一个重要特征 (见图 1.8)：在流动转变成完全湍流之前 (~25% 转捩区长度)， u' 最大值升至比完全湍流区还高的值，即存在一个过冲现象 (overshot)，在这之后才渐近地降至完全湍流区值。图 1.9 给出了整个转捩区内不同流向站脉动量 u' 在边界层内的剖面，从

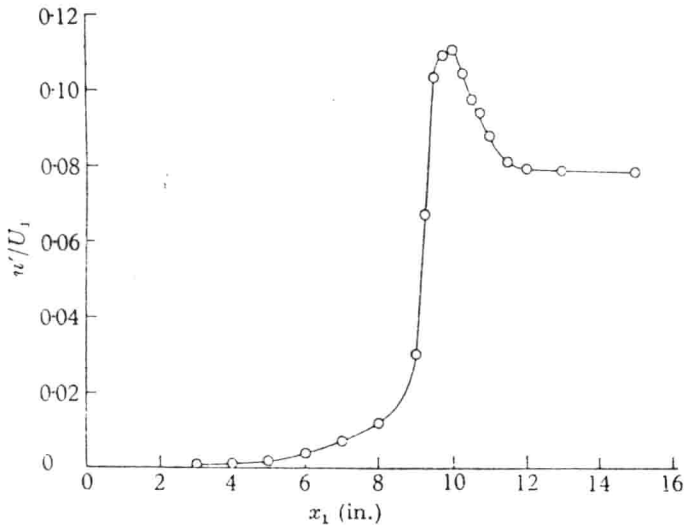


图1.8 转捩区湍动能的过冲现象

图中不仅可以看出 u' 的过冲现象，而且可以看出，当流动从转捩开始向下游发展， u' 分布除在靠近壁面处出现一个尖锐的峰值 (Spike) 之外，还在较远处出现了一个鼓包 (hump)，而且随着流动进一步向下