

# 中国工程热物理学会

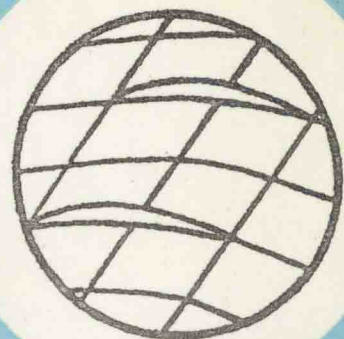
## 热机气动热力学学术会议

### 论文集

一九九七

洛阳

中国工程热物理学会编



感谢中国石化洛阳石油化工工程  
公司及其领导对中国工程热物理学会  
热机气动热力学学术会议的支持和资  
助！

# 热机气动热力学目录

## 一. 湍流模型及计算网格的研究

- 972049 平板转换流动过程的数值模拟第一部分:  
来流湍流度对平板转换过程的影响 ..... 徐星仲、朱斌、蒋洪德 I -1-5
- 972050 平板转换流动过程的数值模拟第二部分:  
压力梯度, 壁面热交换对平板转换过程的影响 ..... 徐星仲、蒋洪德、朱斌 I -6-6
- 972023 能考虑湍流结构的非各向同性的边界条件的影响的微分湍流应力模型 K—E LADSM  
..... 吕盘明 I -12-8
- 972006 网格正交性与疏密分布控制及其关系的研究 ..... 李春、程新广 I -20-6
- 972005 可压缩 Navier—Stokes 方程中双方程湍流模型的选择 ..... 袁新 I -26-6
- 972011 网格正交性对透平跨音流场模拟精度的影响特性研究 ..... 陈铁、刘斌、丰镇平 I -32-6

## 二. 数值模拟方法的研究和应用

- 972056 两种透平叶栅三维流动的计算分析 ..... 朱斌、徐星仲、蒋洪德 II -1-6
- 972033 考虑叶轮机机械动静叶排流场干涉的数值方法研究第一部分:  
确定应力模型和无反射边界条件的构造 ..... 王存诚、胡小仙 II -7-6
- 972034 考虑叶轮机机械动静叶排流场干涉的数值方法研究第二部分:  
计算方法和实例 ..... 胡小仙、王存诚 II -13-6
- 972062 在大位移变形下叶片扭转恢复的气动弹性力学耦合变分理论 ..... 刘高联、高金华 II -19-6
- 972044 四级涡轮多叶片排三元 N—S 解网络并行计算 ..... 赵晓路 II -25-6
- 972043 蒸汽透平三元粘性流场计算 ..... 黄曲贵 II -31-5
- 972029 跨音速压气机转子内三维湍流流场的数值研究 ..... 郭延虎、王保国、沈孟育 II -36-6
- 972037 透平叶栅二次流的数值模拟及分析 (一) 大负冲角工况 ..... 常建忠、丰镇平、李国君、沈祖达 II -42-7
- 972038 透平叶栅二次流的数值模拟及分析 (二)  $8^\circ$  冲角工况 ..... 常建忠、丰镇平、李国君、沈祖达 II -49-5
- 972036 三维跨、超音速紊流流场的数值求解 ..... 李国君、丰镇平、常建忠、李军、徐克鹏、沈祖达 II -54-5

|        |                                    |                 |          |
|--------|------------------------------------|-----------------|----------|
| 972003 | 轴流压气机转子内流数值模拟及叶顶间隙泄漏分析 .....       | 赖焕新、吴克启         | II -59-8 |
| 972019 | 三维叶栅流动的 Euler 解与 N—S 解 .....       | 张东、王正明          | II -67-6 |
| 972001 | 流动过程存在热交换和相变时气(汽)-固-液多相流特性研究 ..... | 黄存魁、陈乃兴、厉树廉、葛满初 | II -73-8 |
| 972039 | 分区处理在叶轮机机械多级叶片排气动计算中的应用 .....      | 黄伟光、陈乃兴、宋权斌     | II -81-8 |
| 972065 | 斜激波与二维混合区的相互作用 .....               | 杜嘉凌             | II -89-5 |
| 972046 | 平面槽流的三维数值模拟 .....                  | 徐进、葛满初          | II -94-7 |

### 三. 设计及优化

|        |                                                      |                           |           |
|--------|------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|
| 972064 | 汽轮机热力性能的概率设计法 .....                                  | 史进渊                       | III -1-6  |
| 972028 | 应用三维粘流计算进行透平叶片的优化径向积叠 .....                          | 陈乃兴、徐燕骥、黄伟光、陈俊杰、陈晓东       | III -7-8  |
| 972002 | 应用环量分布或其导数来设计叶轮机机械叶片的一个反问题解法 .....                   | 陈乃兴、陈俊杰、陈晓东               | III -15-8 |
| 972057 | 考虑冷气掺混和采用复合倾斜叶栅的航空燃气涡轮准三维气动设计 .....                  | 张冬阳、蒋洪德                   | III -23-7 |
| 972051 | 叶轮机机械通流部分气动热力设计体系开发第一部分: 原则与措施 .....                 | 蔡虎、蒋洪德、蔡睿贤                | III -30-6 |
| 972052 | 叶轮机机械通流部分气动热力设计体系开发第二部分: 叶型设计 .....                  | 蔡虎、蒋洪德、徐星仲                | III -36-7 |
| 972018 | 叶栅全三维粘性反问题的数值解 .....                                 | 王正明、蔡睿贤、陈宏冀、张东            | III -43-8 |
| 974042 | 关于 300MW 汽轮机末级采用弯叶片对反力度影响的分析 .....                   | 袁宁、徐文远、芦文才、王仲奇、冯国泰、张振家    | III -51-6 |
| 972004 | 流场诊断技术中基于神经网络的非设计点损失落后角模型 .....                      | 徐纲、袁新、叶大均                 | III -57-6 |
| 972035 | 人工智能专家系统技术在透平叶栅设计系统中的研究与应用 .....                     | 李军、丰镇平、沈祖达                | III -63-6 |
| 972053 | 叶轮机机械数值计算与设计方法进展及其在汽轮机中的应用第一部分:<br>数值计算及设计方法进展 ..... | 蒋洪德、朱斌、徐星仲、张冬阳、蔡虎、刘建军、蔡睿贤 | III -69-6 |

|        |                                                        |                    |           |
|--------|--------------------------------------------------------|--------------------|-----------|
| 972054 | 叶轮机数值计算与设计方法进展及其在汽轮机中的应用第二部分：<br>汽轮机通流部分若干关键技术开发 ..... | 蒋洪德、徐星仲、朱斌、黄伟光、张冬阳 | III -75-7 |
| 972055 | 叶轮机数值计算与设计方法进展及其在汽轮机中的应用第三部分：<br>现场考核试验及结果分析 .....     | 蒋洪德、郭朝阳            | III -82-5 |
| 972022 | 风力发电机叶轮的数值优化设计法 .....                                  | 邓兴勇、陈云程、叶凡、凌志光     | III -87-8 |

#### 四. 非常流动和气动声学

|        |                                        |                     |          |
|--------|----------------------------------------|---------------------|----------|
| 972013 | 用边界单元法计算离心风机噪声辐射 .....                 | 李继芳、颜祖卿、王尚锦、席光      | IV -1-6  |
| 972008 | 离心风机气动 — 声学优化设计方法 .....                | 汤育红、汪庆桓、喻达之         | IV -7-6  |
| 972007 | 离心风机离散噪声预测 .....                       | 喻达之、汪庆桓、汤育红         | IV -13-6 |
| 972041 | 非定常空气流场中污染气体的对流与粘性扩散 .....             | 吴文权、郭少为             | IV -19-6 |
| 972015 | 非定常尾迹耗散过程无粘有粘数值模拟的比较 .....             | 王巍、赵晓路              | IV -25-7 |
| 972027 | 低速轴流压气机旋转失速先兆特征的实验分析 .....             | 聂超群、陈静宜、蒋浩康、徐力平     | IV -32-7 |
| 972009 | 用集总阻抗法分析离心风机管路系统的声学特性 .....            | 王宁、汪庆桓              | IV -39-3 |
| 972030 | 轴流通风机气动噪声的实验与预测 .....                  | 汪庆桓、王宁、喻达之、汤育红      | IV -42-6 |
| 972032 | 汽轮机末级叶片在不同背压条件下的失速流场特性及其对颤振边界的影响 ..... | 陈佐一、王继宏、俞瑞芳、张俊杰、阚伟民 | IV -48-6 |
| 972048 | 关于完全气体无粘可压流动的解析解 .....                 | 蔡睿贤、朱永波             | IV -54-5 |
| 972045 | 环量控制翼型动态失速特性研究 .....                   | 刘晶晶、徐建中             | IV -59-6 |

#### 五. 实验研究

|        |                                       |                    |         |
|--------|---------------------------------------|--------------------|---------|
| 972063 | 非光滑叶片叶栅的气动性能 .....                    | 赵桂林、闻洁、何龙德、许可法、董志成 | V -1-3  |
| 972047 | 有静止顶部间隙弯叶片近壁面静压分布对叶栅气动性能影响的实验研究 ..... | 韩万今、黄洪雁、权生林、王仲奇    | V -4-4  |
| 972061 | 压气机转子内流场三维 LDV 的测量技术 .....            | 徐月亭、蒋浩康            | V -8-8  |
| 972012 | 二维叶片襟翼增升的试验研究 .....                   | 江学忠、叶枝全、叶大均        | V -16-6 |

|        |                          |                 |          |
|--------|--------------------------|-----------------|----------|
| 972020 | 提高叶栅叶片升阻比的新举措的实验研究 ..... | 孟繁娟、吴永芬、陈佑一     | V -22-8  |
| 972021 | 提高叶栅叶片升阻比的新举措的数值研究 ..... | 孟繁娟、吴永芬、陈佑一     | V -30-10 |
| 972016 | 翼型气动性能改进的实验研究 .....      | 刘宝杰、杨晓宁、沈遐龄、高歌  | V -40-6  |
| 972017 | 几种前缘流动控制的实验研究 .....      | 刘宝杰、杨晓宁、沈遐龄、高歌  | V -46-6  |
| 972025 | 混合器混合效果流动可视化在线检测 .....   | 朱锡锋、路雨祥、阮晓东、陈越南 | V -52-6  |
| 972031 | 跨音压气机转子叶尖流场试验与分析 .....   | 桂幸民、王同庆、于清、李运敏  | V -58-6  |
| 972059 | 压气机转子三维紊流流场 .....        | 蒋浩康、马宏伟         | V -64-8  |
| 972060 | 压气机叶尖泄漏涡的发展 .....        | 马宏伟、蒋浩康         | V -72-6  |

## 平板转捩流动过程的数值模拟\*

## 第一部分: 来流湍流度对平板转捩过程的影响

徐星仲

(北京航空航天大学 404 教研室 北京 100083)

朱斌 蒋洪德

(中国科学院工程热物理研究所 北京 100080)

## 摘要

采用作者构造的  $k$  方程转捩湍流模型, 数值模拟了较大跨度来流湍流度情况下平板流动转捩区起点、终点及长度, 与实验结果对比表明, 新模型具有较好地模拟转捩流动能力。

## 一、前言

来流湍流度是影响转捩过程的主要因素之一。在大多数真实流动条件, 尤其是叶栅流动条件下, 一般都存在湍流度很高的尾迹流区和湍流度较小一些 (但仍远高于大气层飞行器外流) 的主流区, 湍流度范围跨度很大。以燃气轮机为例: 主流区内, 低压压气机和风扇的湍流度约为 3~5%, 高压压气机和低压透平的湍流度约为 5~10%, 燃烧室出口即高压透平入口的湍流度可达到 10~20%, 在叶栅尾迹区湍流度的最大值亦可高达 10~20%。因此, 不同来流湍流度对转捩边界层的影响自然成了转捩研究的重点, 可以说, 在影响边界层转捩的诸多因素中, 对不同来流湍流度影响的研究相对来讲是最为成熟的。由于这方面的实验结果较为丰富, 它也是被用来考察湍流模型模拟转捩流动能力的主要手段。

来流湍流度  $Tu_\infty$  对转捩的影响主要表现在对湍流斑生成, 从而对转捩起点和转捩终点的影响上。总的来讲, 较高的  $Tu_\infty$  使得转捩提前发生, 同时转捩区长度缩短; 较低的  $Tu_\infty$  结果则相反。考虑到叶轮机机械流动的湍流度范围, 本文选用以下七个不同值来对其在平板流动情况下的影响效果进行检测, 同时这也是对作者提出的新模型<sup>[1]</sup>模拟转捩流动的能力进行检验:

$$Tu_\infty = 0.1、0.5、0.9、1.25、3.0、5.0、8.0\%$$

## 二、计算手段简介

计算所采用的方程、方法及方程湍流模型见文献<sup>[2]</sup>。平板流动的计算区域及网格见图一, 所有算例的板长  $x_0$  都取为 2.0m, 进口自由流计算区域长度取为板长的 1/2, 上自由流边界离下壁面的距离为 0.3m, 该值约为板长 1/6.7, 这一长宽比例与大多数平板转捩边界层实验条件基本一致<sup>[3]</sup>。计算网格为法 101 站, 流向 201 站, 其中板内为 161

\* 得到国家攀登 B 项目资助

站。流向网格点在平板前缘附近被加密,以尽量减小因前缘奇点而造成对其后流场的影响。法向网格通常为正确模拟湍流粘性底层流动被广泛推荐的第一个网格点处  $y^+$  值 $<2$ ,在模拟转捩流动中则偏大,尤其在来流  $Tu_\infty$  较大时更是如此,因为相同的  $y$  值在流动前部对应的  $y^+$  值一般要比在流动后部对应的  $y^+$  值大,而来流  $Tu_\infty$  增大将使转捩起点位置向板前移动。图2中给出了  $Tu_\infty=8\%$  条件下法向51站以及加密一倍后法向101站时转捩流动计算结果的比较,可以明显看出粗网格引起的不良扰动,尽管此时转捩发生位置处法向距壁面最近网格点的  $y^+$  值已为0.72。因此作者推荐,为准确计算转捩流动,转捩发生位置处壁面附近的法向网格点加密程度在  $y^+<2$  以内区域应设置6~7站,同时应采用等距网格,以准确求解各一阶导数和二阶导数项。

由于来流湍流度  $Tu_\infty$  对转捩起点、终点位置影响较大,若以  $Tu_\infty$  从8%变化到0.1%为例,根据实验结果,  $Tu_\infty=8\%$  时转捩起点位置流向雷诺数  $Re_w (= \rho u_\infty x_0 / \mu_t)$  为  $0.08 \times 10^6$ ,而  $Tu_\infty=0.1\%$  时转捩终点位置处  $Re_w$  则达到  $4.0 \times 10^6$ 。实际计算时因受机时和内存限制,流向网格站数无法太多,从而限制了所取的板长。因此,最理想的办法就是通过改变来流板长雷诺数  $Re_w$ ,使得能在有限的板长之内容纳下大跨度  $Tu_\infty$  和压力梯度情况下所有算例模拟的转捩流动。这显然就需要考察现有的转捩湍流模型是否受  $Re_w$  的影响。图3中给出了  $Tu_\infty=1.25\%$  时在相同板长、两种不同自由流速度  $u_\infty$  下转捩流动的计算结果,由图可见,  $Re_w$  的变化对转捩区起点、终点的位置影响甚微。实验结果和文献<sup>[4]</sup>中类似的数值试验也得出了相同的结果。因此,在以下计算中,均采用上面已介绍的计算区域,除在  $Tu_\infty \leq 0.9\%$  时选取  $u_\infty = 35\text{m/s}$  之外,其它各种情况下均选取  $u_\infty = 22\text{m/s}$ 。

### 三、低 $Tu_\infty$ ( $=0.1\%$ )、中 $Tu_\infty$ ( $=1.25\%$ ) 和高 $Tu_\infty$ ( $=5\%$ ) 情况

文献<sup>[1]</sup>中已详细给出了中等来流湍流度  $Tu_\infty=1.25\%$  的计算结果。对低来流  $Tu_\infty$  和高来流  $Tu_\infty$  情况,计算同样显示出了较好结果。图四中给出了  $Tu_\infty=5\%$  时边界层厚度随的变化,由图可见在转捩发生前的层流区域,  $\theta$  与经验曲线完全吻合,进入转捩区后,  $\theta$  的变化速率明显地加大,在完全湍流区的变化规律也与经验曲线相一致,即随着板长  $x$  的  $6/7$  次方增加。图五显示了  $Tu_\infty=5\%$  情况下转捩区内速度剖面的演变过程。

计算得出的湍动能剖面(图未给出)表明,因为有自由流  $Tu_\infty$  的存在,转捩发生之前的层流流动中均有较小的湍动能存在,而且随着  $Tu_\infty$  的增加,层流中的湍动能  $k$  值也增加。流动在进入转捩区后不久,湍动能快速增加;并且,在这三种情况下均有过冲现象存在(见图六、七),作为对比,图八、九分别给出文献<sup>[3]</sup>在  $Tu_\infty = 0.03\%$  时和文献<sup>[6]</sup>在  $Tu_\infty = 0.5\%$  时类似现象的实验结果。利用 Bushnell 对转捩区流动中湍流长度尺度系数  $K$ 、 $(L/\delta)_{crit}$  的修正曲线,在  $k$  方程湍流模型基础上建立转捩模型时若对湍流长度尺度进行上述修正,则能够给出湍动能过冲现象的结果<sup>[1]</sup>,但本文的模型中并没有直接进行上述修正,只是通过精心构筑  $F_\mu$  函数,使之能够充分反映流动湍流特征。因此从对过冲现象能够直接进行模拟这一点看来,本文提出的新模型应该说是正确地包含了更多转捩流动的物理信息。

### 四、来流湍流度对转捩过程影响的模拟



运用作者提出的新模型, 对前言中列出的7个较大跨度范围 $Tu_{\infty}$ 对转捩流动起点、终点影响的情况进行了数值模拟。图十给出了各种情况下壁面 $C_f$ 值分布的计算结果, 可以看出较高 $Tu_{\infty}$ 使得转捩提前发生, 并且转捩区长度也将缩短, 较低 $Tu_{\infty}$ 影响结果则相反。图十一为转捩起点、终点的数值计算结果与实验结果<sup>[1]</sup>比较, 在湍流度 $Tu_{\infty} < 3\%$ 情况下本文模型给出了准确的转捩区起点、终点位置, 在高湍流度时转捩起点位置的模拟也比较准确, 但转捩区长度比实验值偏短。图十二为各种 $Tu_{\infty}$ 下边界层形状因子 $H$ 的计算结果, 可以看出, 它们均由层流区的值 $\sim 2.6$ 经过转捩区后降至完全湍流区值约 $1.3 \sim 1.4$ , 而且在转捩起始阶段变化剧烈, 以后则稍缓过渡, 这与前面关于湍动能变化的结果也相一致。

## 五、小结

通过对大跨度来流 $Tu_{\infty}$ 下转捩流动特性数值模拟的结果可以看出, 本文新建立的模型在不同 $Tu_{\infty}$ 来流条件下, 均能准确地预估出转捩区流动参数, 如壁面 $C_f$ 值、形状因子 $H$ 、边界层动量厚度 $\theta$ 、转捩起点及终点等的主要特征, 对转捩区流动中速度剖面、湍动能剖面以及湍动能的过冲现象也能基本定性地模拟出来。

## 参考文献

- [1] 徐星仲, 朱斌, 蒋洪德, “一种新的k方程转捩湍流模型”, 中国工程热物理学会热机气动热力学分会论文集, 武夷山, 1996, 将于工程热物理学报发表。
- [2] 徐星仲, “转捩流动的数值方法研究”, 中国科学院工程热物理研究所博士学位论文第一部分, 1996。
- [3] Abu-Ghannam B. J. and Shaw R., “Natural Transition of Boundary Layers – The Effects of Turbulence, Pressure Gradient, and Flow History”, J. Mech. Eng. Sci., Vol. 22, No. 5, 1980.
- [4] Jiang H., Moore J. G. and Moore J., “Low Reynolds Number One-Equation Turbulence Modeling for Prediction of Transitional Flows Over A Flat Plate”, AIAA 90-0242, 1990.
- [5] Schbauer G. B. and Klebanoff P. S., “Contributions on the Mechanics of Boundary-Layer Transition”, NACA TN 3489, revised as NACA Report 1289, 1956.
- [6] Wang Ting and Dadong Zhou, “Spectral Analysis of Boundary-Layer Transition on a Heated Flat Plate”, J. Heat and Fluid Flow, 17:12-21, 1996.



图1 计算域及计算网格

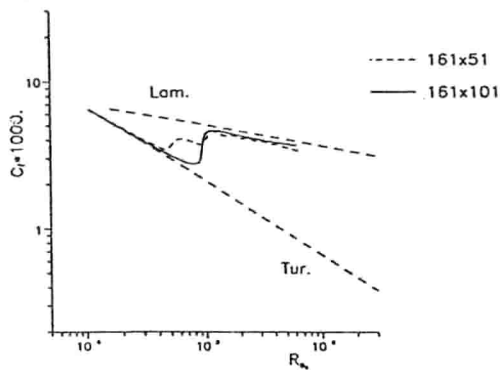


图2 近壁区网格节点对转捩计算的影响

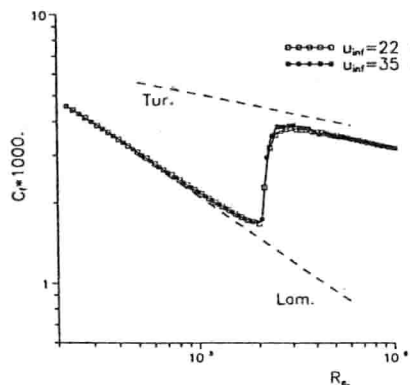


图3 来流板长雷诺数对转捩的影响

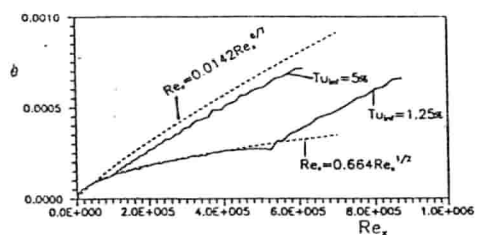


图4 边界层动量厚度的计算结果

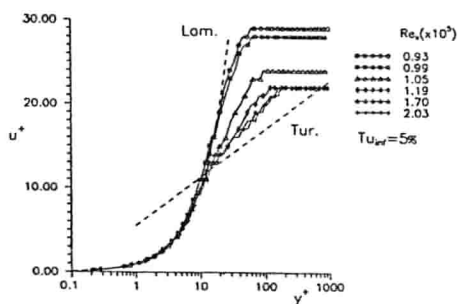


图5 转捩区内速度剖面的演变过程

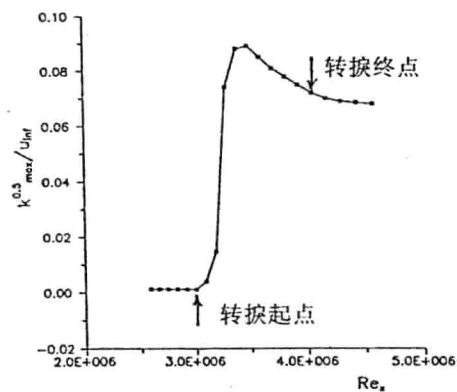


图6  $Tu_{inlet} = 0.1\%$ 时湍动能剖面峰值沿流向的变化

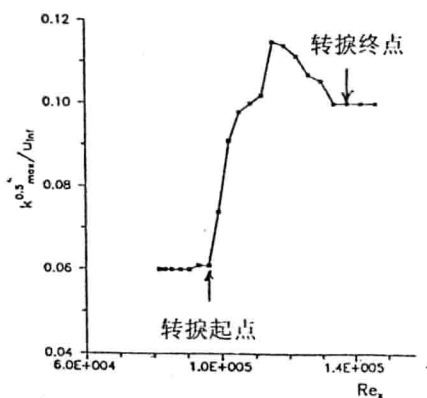


图7  $Tu_{inlet} = 5\%$ 时湍动能剖面峰值沿流向的变化

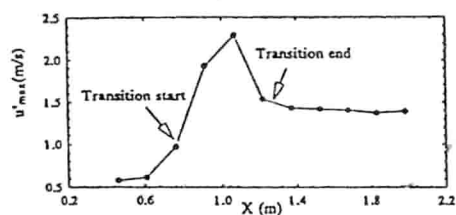
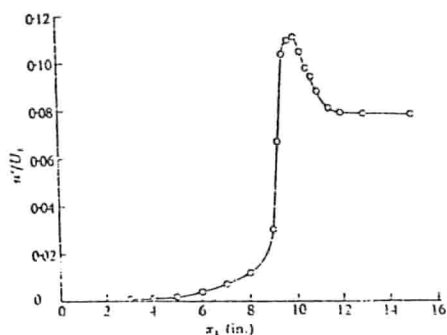


图 8  $Tu_x=0.03\%$  时  $u'$  剖面峰值沿流向变化的实验结果<sup>[3]</sup> 图 9  $Tu_x=0.5\%$  时  $u'$  剖面峰值沿流向变化的实验结果<sup>[6]</sup>

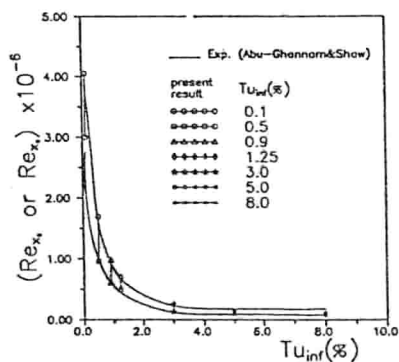
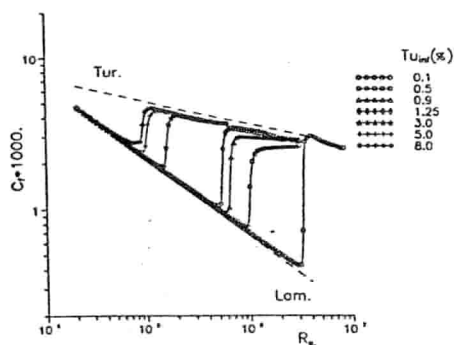


图 10 各种  $Tu_x$  时壁面  $C_f$  值的计算结果

图 11 转换区起点、终点计算值与实验结果的比较

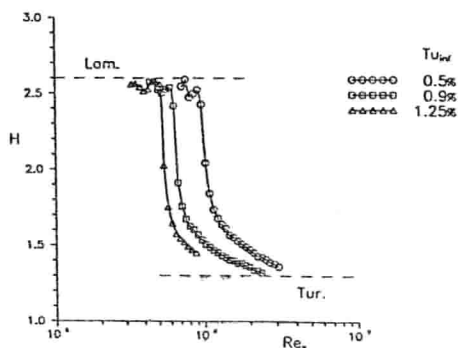
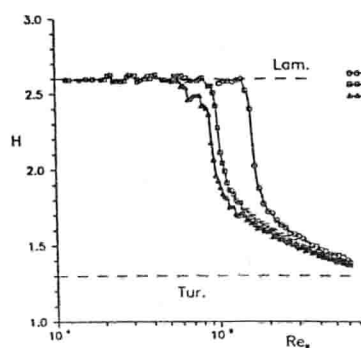


图 12a)

图 12b)

图 12 各种  $Tu_x$  时边界层形状因子的计算结果

## 平板转捩流动过程的数值模拟\*

### 第二部分: 压力梯度、壁面热交换对平板转捩过程的影响

徐星仲

(北京航空航天大学 404 教研室 北京 100083)

蒋洪德 朱斌

(中国科学院工程热物理研究所 北京 100080)

#### 摘要

采用作者构造的  $k$  方程转捩湍流模型, 数值分析了不同来流湍流度时几种不同顺、逆压梯度存在情况、壁面存在不同热交换强度情况下平板的转捩流动过程。有压力梯度时的计算结果表明: 新建立的  $k$  方程转捩湍流模型基本上具备了对压力梯度影响效果的模拟能力; 存在热交换时的计算显示: 在中等以下来流湍流度时计算结果与实验结论一致, 在高来流湍流度时模型计算得出的结果有待实验验证。

#### 一、前言

大多数实际流动情况下壁面都存在着压力变化, 因此压力梯度对流动转捩的影响受到了很大的重视。燃气轮机和蒸汽轮机叶片以及航空器机翼的设计中, 为达到降低型损的目的, 主要采用控制边界层发展的手段。大量的实验研究结果都表明, 在叶轮机叶片表面有明显的转捩现象存在, 而且层流段长度有时甚至覆盖叶片长度的 20% 以上, 这样, 基于对有压力梯度存在时边界层流动状态清晰的认识和有效的预测手段, 就可以筛选和设计出特定工况下的叶片型线, 以达到较高的流动效率。在有压力梯度转捩边界层流动的数值模拟方面, 以往较多的是边界层算法, 近几年来, 基于各种形式湍流模型求解 NS 方程的算法得到了很大发展, 如 Moore<sup>[1]</sup>, Savil<sup>[2]</sup>, Rodi<sup>[3]</sup> 都在这方面做了不少工作。考察压力梯度对转捩边界层影响效果, 也正在成为检验新建立转捩模型的一个手段。

在转捩区流动中, 不仅壁面摩擦系数  $C_f$  由层流区值上升至湍流区值, 而且壁面换热量也呈现同样的特性。因此, 转捩传热特性的研究, 对于工作在高温条件下的燃气透平叶片设计尤为重要。在以往的设计中由于缺乏这方面经验和可靠的实验数据而不考虑这一因素, 往往导致叶片寿命的缩短或者因设计冷却气流量过多而使得发动机效率达不到应有的水平。就目前状况而言, 对转捩边界层传热特性的研究工作还远远不够, 而且仅有的几个实验结果中显示出的转捩区传热特性的复杂性更增加了这项工作的难度。由于缺乏足够的有说服力的实验数据, 目前对壁面换热对转捩过程的影响还没有统一的结论, 在转捩湍流模型模拟传热特性研究方面也没见有结果发表。对于空气, 层流边界层内 Prandtl 数  $Pr_t$  为 0.72, 完全湍流边界层 Prandtl 数  $Pr_t$  为 0.9 左右, 而对于转捩区流动, 文献<sup>[4]</sup>、<sup>[5]</sup>中实验结果显示出: 转捩区内雷诺相似律不再成立, 转捩完成后早期湍流的 Prandtl 数明显高于完全湍流区值, 达到 1.2 左右。或许这就是利用湍流模型模拟转捩区流动中传热特性的障碍之一? 因此, 本文可以说是这方面工作的一个探索。

\* 得到国家攀登 B 项目资助

## 二、计算工况

由于新转捩湍流模型<sup>[6]</sup>相对于原  $k$  方程湍流模型基本形式引入的唯一修正是  $F_\mu$  函数, 而  $F_\mu$  函数的确定又依赖于基本方程中的变量  $k$  和能充分体现湍流特征的涡量  $\omega$ , 鉴于这种直接的封闭关系, 作者认为它应该包含了因压力梯度、热交换存在而对流场影响的信息, 所以对模型本身不作任何修正而将之直接应用于计算。

在有压力梯度的计算中, 利用文献<sup>[7]</sup>中的方法, 在平板表面设计了四种不同的压力梯度, 图 1 中给出了流场收敛后平板上的实际压力分布与期望值的比较, 可见二者相差很小, 完全达到了预期的效果。计算是在两种来流湍流度 ( $Tu_\infty = 0.9\%、3\%$ ) 情况下进行的。

热交换存在时的计算将对三个典型来流湍流度 ( $Tu_\infty = 0.5\%、1.25\%、5\%$ ) 情况下加热平板和冷却平板的转捩流动特征与绝热情况进行比较, 等温平板与自由流的温差  $T_w - T_\infty$  分别为  $-50^\circ\text{C}、-25^\circ\text{C}、-10^\circ\text{C}$  及  $+10^\circ\text{C}、+25^\circ\text{C}、+50^\circ\text{C}、+100^\circ\text{C}$ , 自由流温度取为室温  $+15^\circ\text{C}$ 。计算中假设转捩区内雷诺相似律仍然成立, Prandtl 数取为 0.9。

## 三、压力梯度对平板转捩流动影响的数值模拟

图 2、3 中给出了壁面  $C_f$  值的计算结果。由图可见, 在两种来流  $Tu_\infty$  情况下, 顺压梯度都使得转捩起点向后推移; 而逆压梯度效果则相反, 并且影响更明显。仔细比较两种  $Tu_\infty$  情况下压力梯度对转捩区流动的影响程度, 可见在来流  $Tu_\infty$  较高时, 影响较小。文献<sup>[8]</sup>中根据大量的实验结果认为: 在  $Tu_\infty > 5\%$  时可不考虑压力梯度对转捩的影响。本文模型计算得出的压力梯度对转捩影响的上述特征与实验结果相符合。图 4 为将转捩起点位置、压力梯度用起点处的动量厚度雷诺数和压力梯度系数  $\lambda_\theta (= (\theta^2/\nu) (du_\infty/dx))$  表达后计算结果与经验曲线<sup>[9]</sup>的比较, 可见计算结果定性上基本正确, 而定量上存在一定差别。作者分析后认为, 造成差别的原因之一可能是由于在势流区存在加速或减速时边界层动量厚度  $\theta$  难以计算准确。总的看来, 本文新建立的转捩湍流模型基本上具备了模拟压力梯度对转捩区流动影响的能力。

## 四、加热、冷却对平板转捩流动影响的数值模拟

图 5 中给出了加热平板流动的壁面  $S_f$  数以及  $Tu_\infty = 1.25\%$  时  $C_f$  值的变化规律及其与绝热平板结果的比较, 图 6 中给出了冷却平板上流动的壁面  $S_f$  值的计算结果, 由图可见, 它们均呈现典型的转捩流动特征, 且可看出, 由  $C_f$  值和  $S_f$  数极小值和极大值确定的转捩区域起点、终点位置完全一致 (所有计算均证实这一点)。由于目前求解的能量方程与动量方程之间直接使用了雷诺比拟, 因此这一结果是必然的, 但这与文献<sup>[10]</sup>中实验结果显示出的转捩区内温度边界层发展滞后于动量边界层结果相矛盾。显然, 若要正确模拟出转捩区中这一滞后特征, 需要更多的实验数据以及有换热存在时转捩机理的研究。

在  $Tu_\infty = 0.5\%、1.25\%$  时较强的加热使得转捩较为提前发生, 这一效果简单地可以

认为是由于温度升高,使得近壁面区流体的层流粘性系数 $\mu_e$ 增加(对于空气)所致;但在 $Tu_\infty=5\%$ 情况下这种解释不再成立,此时较强的加热使得转捩起点略微呈现推迟的趋势。

在 $Tu_\infty=0.5\%$ 、 $1.25\%$ 两种情况下,冷却都使得转捩起点有不同程度的推迟,但在高来流湍流度 $Tu_\infty=5\%$ 情况时,计算结果再次显示出不同的特性,三种冷却强度对转捩区的起、终点位置几乎不产生影响。

图7中给出了两种典型情况下温度剖面在转捩区内的演变图,可以看出,它们均由层流剖面随着转捩区中湍流的不断生成而向湍流剖面过渡。图中同时给出了两条转捩后湍流区速度剖面的经验关系,文献<sup>[4]</sup>认为:在转捩结束后的早期湍流阶段,湍流 $Pr_t$ 数要明显高于完全湍流区值( $\sim 0.9$ )。

将 $T_c-T_e$ 对三种来流 $Tu_\infty$ 情况下流动转捩起点、终点及长度的影响结果整理成图8。由图中可以看出,总的来讲,在来流 $Tu_\infty$ 较低( $<1.25\%$ )时,冷却平板能使转捩区起点、终点位置明显推迟,转捩区长度也得到加长,而加热情况则呈现相反的结果,这些结果与Liepmann<sup>[10]</sup>通过加热手段影响边界层转捩的实验结果定性上是一致的;但在高来流 $Tu_\infty(=5\%)$ 情况下,冷却与加热对转捩区的影响不明显,或者说,如压力梯度存在情形时一样(见第三小节),在 $Tu_\infty>5\%$ 时来流湍流度的影响占主导地位,热交换的影响作用可不考虑。看来传热对转捩流动影响的机制还需要更深入的分析以及与相应实验结果的比较。

## 五、小结

采用作者新建立的k方程转捩湍流模型对不同来流 $Tu_\infty$ 情况下有压力梯度平板转捩流动的计算结果表明,由于构筑了恰当的 $F_\mu$ 函数,目前的模型基本上具备了对压力梯度影响的模拟能力,因此可直接应用于其它有压力梯度存在的场合,如机翼绕流、叶栅绕流等等。

壁面有热交换存在对转捩区流动影响的数值模拟结果显示:在来流 $Tu_\infty$ 较低时计算得出的结果与实验结果定性一致,但 $Tu_\infty$ 较高时的计算结果还有待实验验证。

## 参考文献

- [1] Moore, J. and Moore, J. G., "Osborne Reynolds: Energy Methods in Transition and Loss Production: A Centennial Perspective", J. Turbomachinery, Vol. 117, Jan. 1995
- [2] Savil, A. M., "Some Recent Progress in the Turbulence Modeling of By-pass Transition", Near-Wall Turbulent Flows, So R. M. C., Speziale C. G. and Launder, B. E. Ed., 1993
- [3] Rodi, W. and Launder, B. E., "The Prediction of Laminarization with A Two-Equation Model of Turbulence", International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972
- [4] Blair M. F., "Influence of Free-Stream Turbulence on Turbulent

Boundary-Layer Heat Transfer and Mean Profile Development, Part 1: Experimental Data", ASME Journal of Heat Transfer, Vol.105, 1983.

- [5] Wang T., Simon T.W. and Buddhavarapu J., "Heat Transfer and Fluid Mechanics Measurements in Transitional Boundary Layer Flows", ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power, Vol.107, 1985.
- [6] 徐星仲, 朱斌, 蒋洪德, "一种新的k方程转捩湍流模型", 中国工程热物理学会热机气动热力学分会论文集, 武夷山, 1996, 将于工程热物理学报发表.
- [7] 徐星仲, "转捩流动的数值方法研究", 中国科学院工程热物理研究所博士学位论文第一部分, 1996.
- [8] Mayle, R. E., "The Role of Laminar-Turbulent Transition in Gas Turbine Engines", ASME paper 91-GT-261, 1991
- [9] Abu-Ghannam B. J. and Shaw R., "Natural Transition of Boundary Layers - The Effects of Turbulence, Pressure Gradient, and Flow History", J. Mech. Eng. Sci., Vol. 22, No. 5, 1980.
- [10] Liepmann H. W. et al, "Control of Laminar Stability Waves Using a New Technique", J. Fluid Mech. 118, 1982.

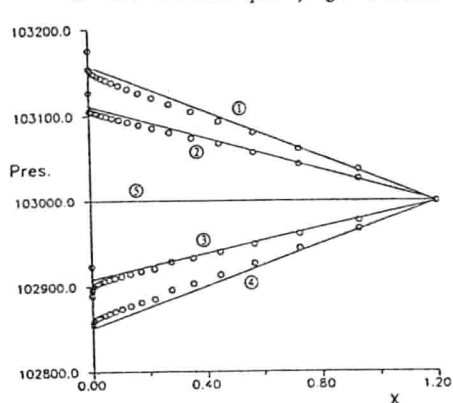


图 1 计算所采用的四种不同压力梯度

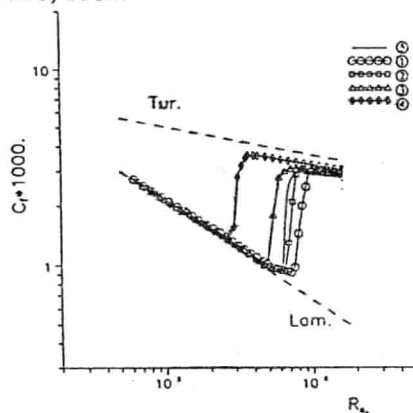


图 2  $Tu_x=0.9\%$ 时压力梯度对转捩的影响

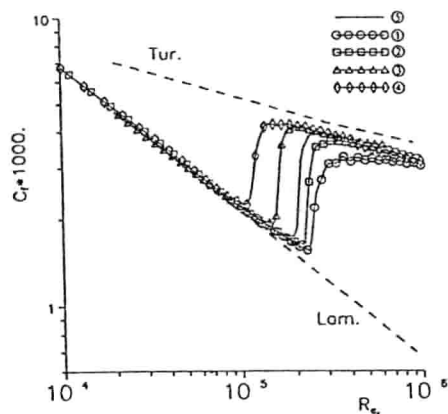


图 3  $Tu_x=3\%$ 时压力梯度对转捩的影响

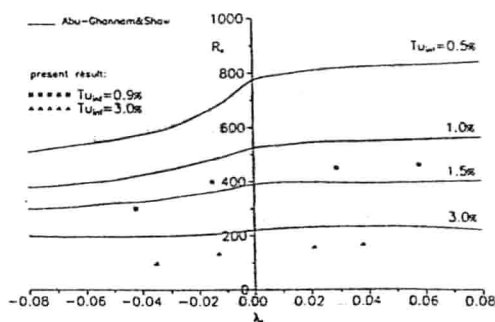


图 4 转捩起点计算结果与实验的比较

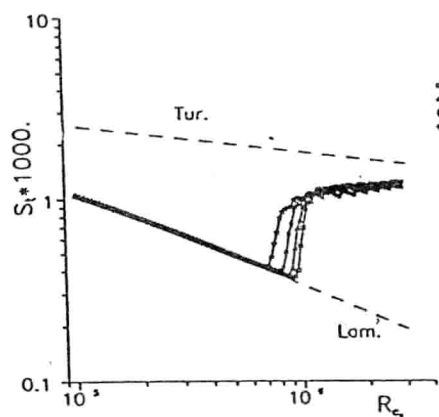


图 5a)

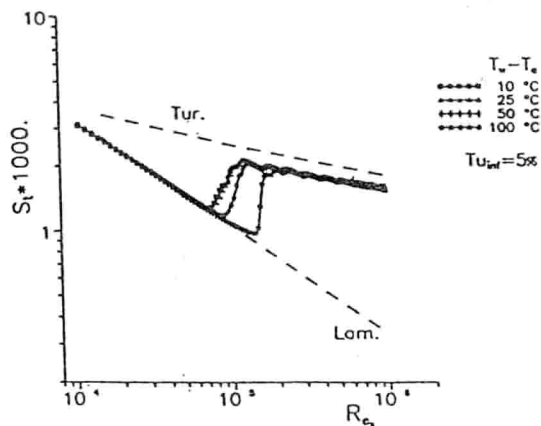


图 5b)

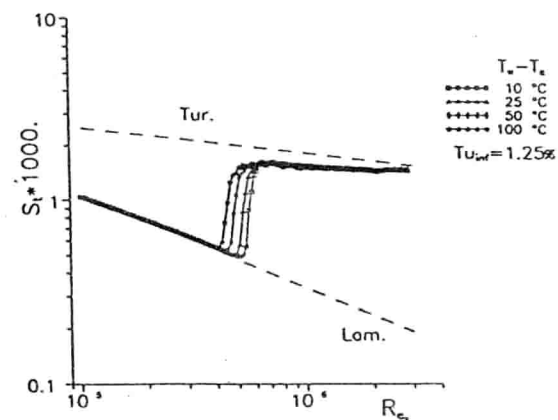


图 5c)

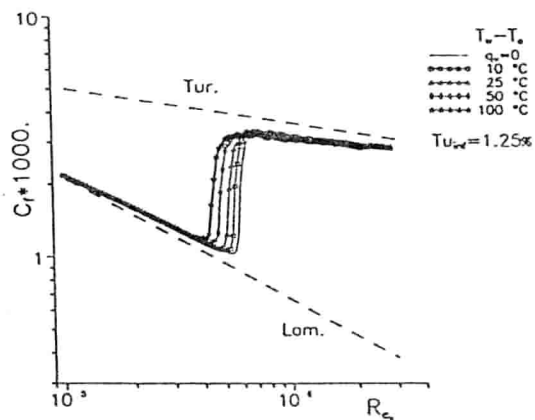


图 5d)

图 5 加热平板转换流动  $St$  数、 $Cr$  值计算结果

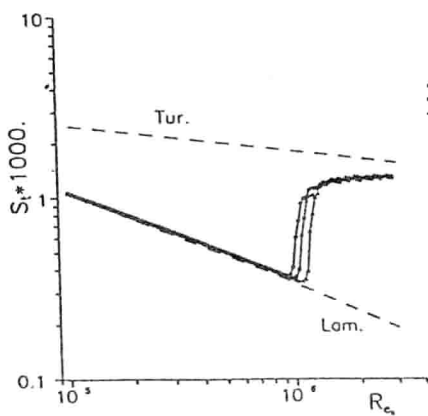


图 6a)

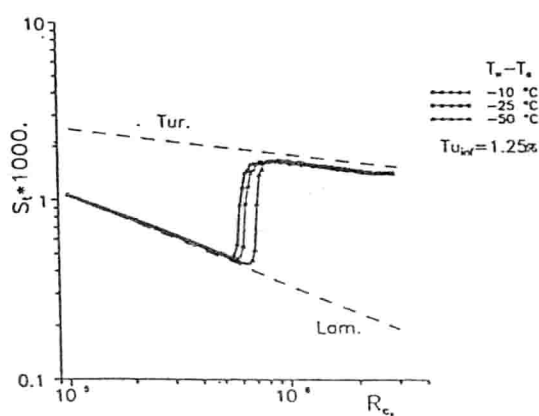


图 6b)



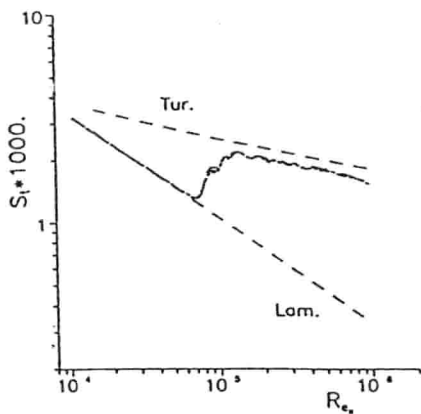


图 6c)

图 6 冷却平板转捩流动  $S_t$  数计算结果

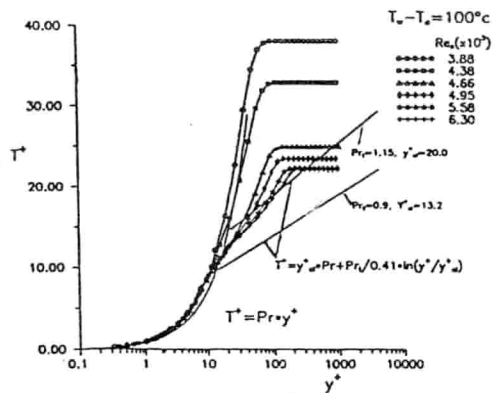


图 7a)  $Tu_{\infty}=1.25\%$

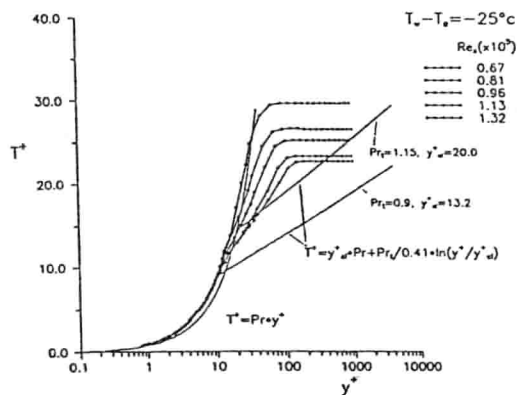


图 7b)  $Tu_{\infty}=5\%$

图 7 传热存在时温度剖面在转捩区内的演变过程

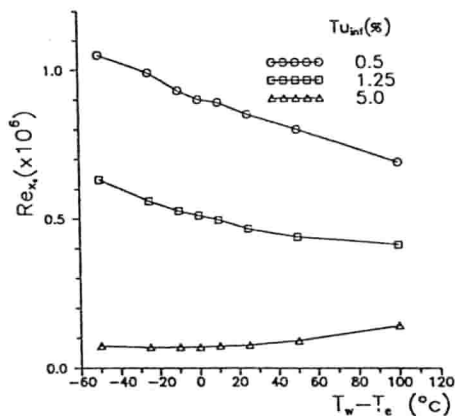


图 8a) 转捩区起点

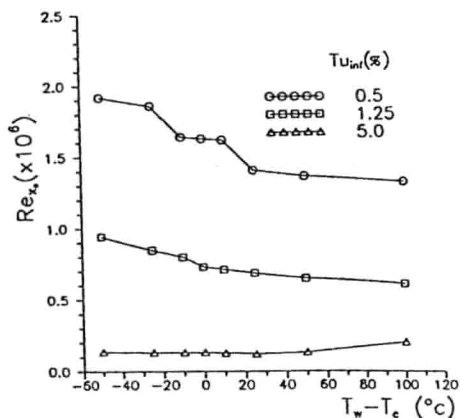


图 8b) 转捩区终点

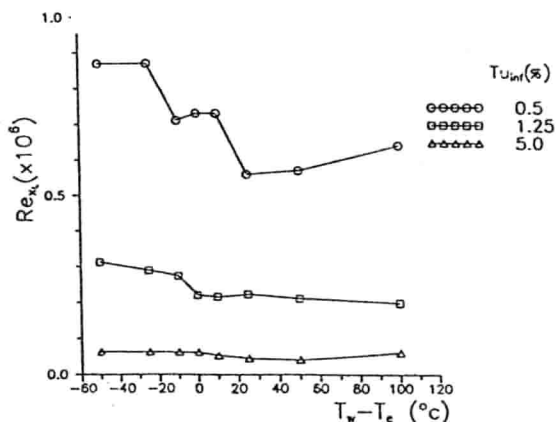


图 8c) 转捩区长度

图 8 传热存在对转捩起点、终点及长度的影响