

文章编号: 1000-8055(2007)11-1909-06

带有压力梯度的平板边界层转捩数值模拟

董 平, 黄洪雁, 冯国泰

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 对零压力梯度和带有压力梯度的平板边界层转捩实验 T3A, T3C1 和 T3C2 进行了数值模拟, 计算结果与实验值吻合的较好, 并得出以下的结论: 压力梯度的存在对转捩起始的位置有较大的影响; M-L 转捩模型能比较准确地预测转捩的发生和发展过程, 但 M-L 一方程转捩模型因为要根据经验选取转捩起始动量厚度雷诺数, 所以在通用性上相对 M-L 二方程转捩模型要弱; 使用 M-L 转捩模型计算过程中, 根据湍流的性质选取进口粘性比有助于正确地预测转捩的发展过程。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 压力梯度; 平板边界层转捩; 转捩模型; 数值模拟

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Numerical simulation of boundary layer transition under pressure gradient

DONG Ping, HUANG Hong-yan, FENG Guo-tai

(School of Energy Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Numerical simulation was performed for the flat plate boundary layer transition test at zero and non-zero pressure gradients, T3A, T3C1 and T3C2. The results have been validated through the experimental data, showing that the pressure gradient could have great influence upon the starting position of transition process; M-L transition model could predict accurately the transition and development process. However, the applicability of M-L one equation transition model is limited as compared with M-L two equation transition model, since it depends on how to correctly choose the transition onset momentum thickness Reynolds number by experiences. During calculation with M-L transition model, selecting the import viscosity based on the nature of vortex assists in predicting the transition process.

Key words: aerospace propulsion system; pressure gradient; flat plate boundary layer transition; transition model; numerical simulation

转捩现象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。在叶轮机械中转捩通常产生较大的分离而直接影响叶片的气动性能和传热特性, 目前通过求解雷诺平均的 N-S 方程 (RANS) 预测流场难以令人满意的原因之一就是没有一个通用的湍流模型可以对叶轮机叶片表面

边界层中转捩、分离等复杂现象进行准确的预估和模拟。在工程应用上模拟转捩流动大都依赖于由实验总结出的经验准则, 国外研究者提出了一些模拟转捩的模型, 比较著名的有 Abu Ghannam & Shaw (AGS) 模型^[1]、Steelant & Dick 模型^[2]、Suzen & Huang (S-H) 模型^[3]等, 国内一些学者

收稿日期: 2006-11-06; 修订日期: 2007-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(50476028); 国家自然科学基金(50576017)

作者简介: 董平(1974), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士生, 主要从事叶轮机械气动热力学研究。

也进行了相关的研究,如顾金生^[4]、郭玉波^[5]等人,这些模型大都还有一些不足之处,Menter & Langtry(M-L)^[6]的转捩模型对前人提出模型的很多缺点作了较大的改进,通用性和准确性都得到很大的提高^[7].

Coupland^[8]所作的平板边界层转捩 T3 系列实验通常被作为验证 CFD 软件转捩预测能力的经典算例,本文的主要工作对其中带有压力梯度的 T3C1 和 T3C2 进行数值模拟,并选用与其进口条件相似的零压力梯度的实验 T3A 进行对比,目的是一方面对 M-L 模型对转捩的预测能力进行校核,另一方面是通过计算结果对转捩现象流动特点进行细致研究.

1 数值方法和模拟工况

在较早的转捩模型中,如 AGS 模型,转捩起始点雷诺数通常根据经验关系式由进口的湍流强度或者附面层动量厚度雷诺数等得出,但一方面实际情况下流场中局部参数是各不相同的,仅凭宏观变量并不能准确地描述整个流场的流动情况;另外如果边界层网格点数比较稀疏,积分过程中容易引起较大的误差,并且由于其只适用于结构化网格而影响了在非结构化网格和并行计算中的应用,也严重影响了这类方法的准确性和通用性.M-L 转捩模型对上述相应的缺点做出了修改,其特点之一就是修改了由 S-H 模型发展而来的间歇系数的输运方程,采用涡量雷诺数来代替动量厚度雷诺数来作为转捩起始点雷诺数,涡量雷诺数只与局部变量有关,把转捩的特性与局部变量相关联;另一个特点是考虑到系统的流动输运特性,引入转捩起始动量厚度雷诺数的输运方程,转捩起始动量厚度雷诺数是一个输运变量;同时对于转捩起始动量厚度雷诺数的取值,M-L 转捩模型结合 AGS 转捩模型和 S-H 模型的优缺点提出了一个新经验关系式,通过考虑到局部的湍流强度和压力梯度等参数,准确性和通用性都得到了增强了.M-L 转捩模型具体的公式推导可参见文献[6].

T3A 的实验示意图见图 1(a),T3C1 和 T3C2 的示意图见图 1(b),实验条件见表 1.由实验条件可见,所选实验的进口湍流强度处于与实际涡轮工作条件相似的范围:3%~6%,其中 T3C1 和 T3C2 通过带有收缩/扩张型线的上端壁在流动过程中形成正/逆压力梯度,这与涡轮叶片吸力面的工作条件相似.本文选用商业程序 CFX

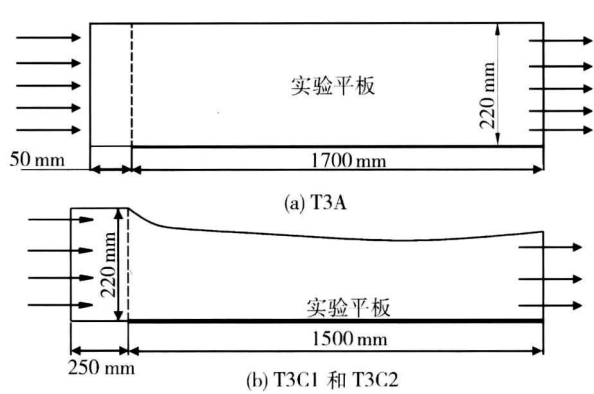


图 1 平板转捩实验示意图
Fig. 1 Sketch of the flat plate boundary layer transition experiments

表 1 实验的进口条件

Table 1 Inlet boundary condition of test cases			
	T3A	T3C1	T3C2
进口速度/(m/s)	5.4	5.9	5.0
湍流强度/%	3.0	6.6	3.0
压力梯度	无	有	有
粘性比	13	100	30

作为求解器,湍流模型选取 $k-\omega$ 模型的 SST 格式,包含全湍流格式和应用 M-L 转捩模型形式,同时为了增加对比性,还增加了完全层流形式算例,差分格式均为二阶迎风格式.根据文献[8],T3 系列实验可以看作二维流动,但由于 CFX 对于二维计算的局限性,只能使用三维网格近似二维网格,所以在平板计算区域展向取 140 个网格点,流向取 600 个网格点,周向取 4 个网格点,合计 33.6 万.为准确地捕捉边界层的速度分布,在壁面附近网格进行了加密,距壁面第一个网格点的 $y^+ < 1$,并在边界层内保证 30 个网格点,同时在流向(特别是在转捩的发生区域)的网格也进行加密,以保证准确预测转捩过程.

2 平板转捩的数值模拟结果与分析

在以下图例中, Re 代表预测的转捩起始动量厚度雷诺数; $VisRt$ 代表进口边界的湍流粘性分子粘性之比值.图 2 是壁面阻力摩擦系数分布图,壁面阻力系数的定义是: $C_f = \tau / (0.5 \rho u_{ref}^2)$, τ 是流向方向上的壁面切应力, u_{ref} 为附面层边缘处势流区域的速度分布,通常认为摩擦系数最小处为转捩的起始点,最大之处为转捩的终点.图 3 是沿流向不同位置速度剖面轮廓线和边界层厚度分

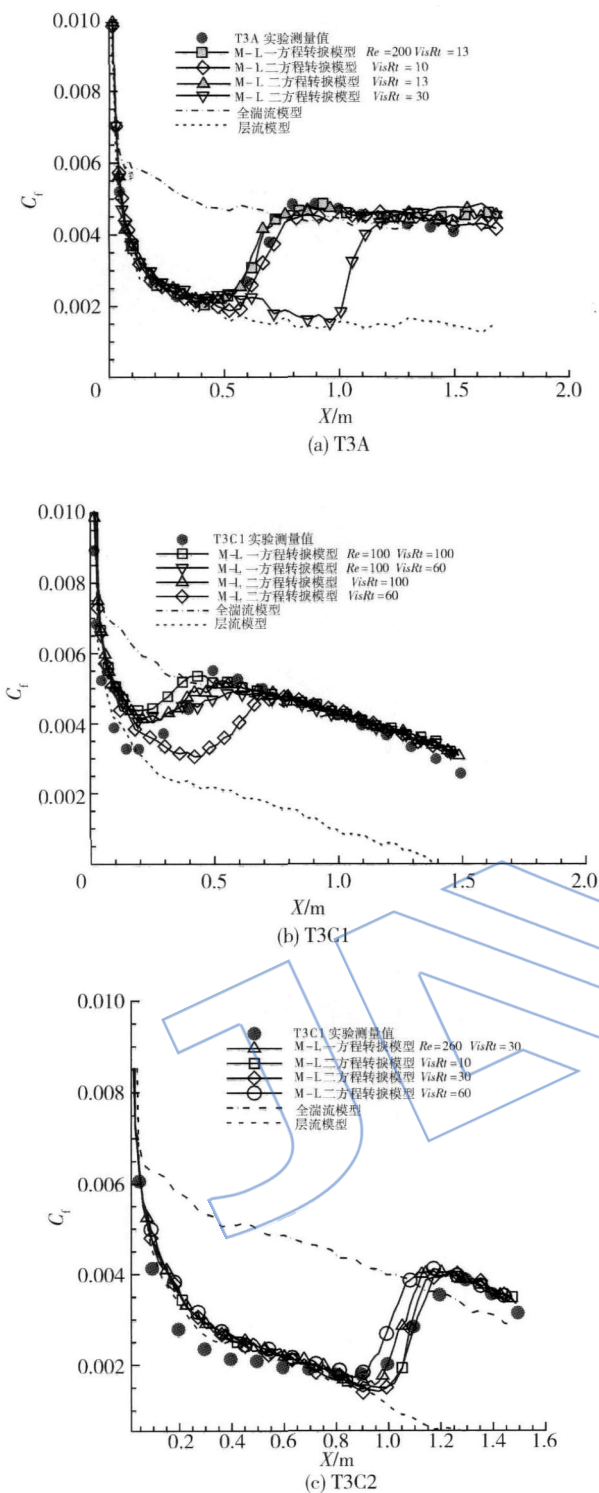


图 2 壁面阻力摩擦系数分布沿流向分布
Fig. 2 Distribution of skir friction coefficient

布, 选用 M-L 二方程模型计算结果的速度剖面与实验值速度剖面进行对比, 取当地流速等于 99% u_{mid} 时的高度为边界层的厚度, u_{mid} 为中径处自由流(势流状态)速度. 图 4 是边界层形状参数分布, 形状参数的定义是: $H = \delta_i / \delta$, δ_i 为边界层位移厚度, δ 为边界层动量损失厚度, 形状参数是衡

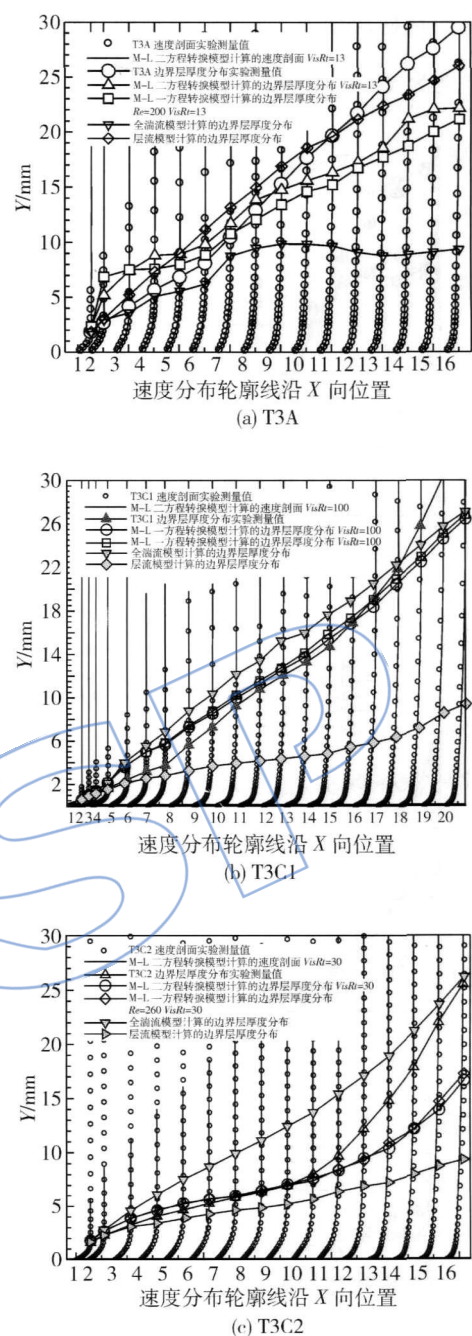


图 3 流向位置速度分布轮廓线和边界层厚度
Fig. 3 Distribution of velocity profile and boundary layer thickness

量边界层流动状态的参数, 一般情况下认层流状态的形状参数应该大于 2, 在湍流边界层内由于流速分布更趋均匀化而边界层位移厚度 δ_i 减小, 由于阻力的增加而边界层动量损失厚度 δ 增加, 形状参数下降到 1.5 以下, 所以如果发生转捩, 形状参数必然有一个从高向低的跳跃过程. 图 5 和图 6 分别为粘性比与湍流强度的分布云图, 为了对比方便在图中加入了相应的边界层厚度沿流向分布曲线, 粘性比是湍流粘性与分子粘性比值, 粘

性比越大越趋向湍流, 越小则越趋向层流, 湍流强

度的定义为 $I = \sqrt{\frac{2}{3}K} |u_{ref}|$.

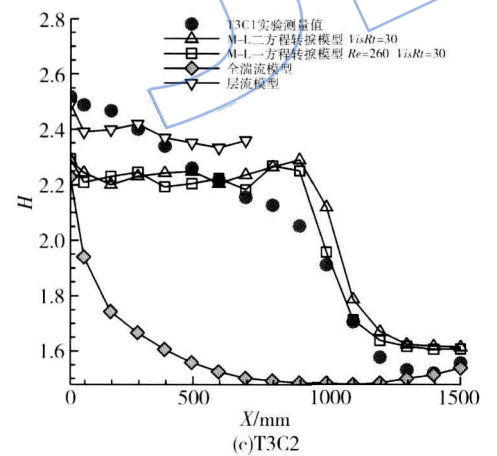
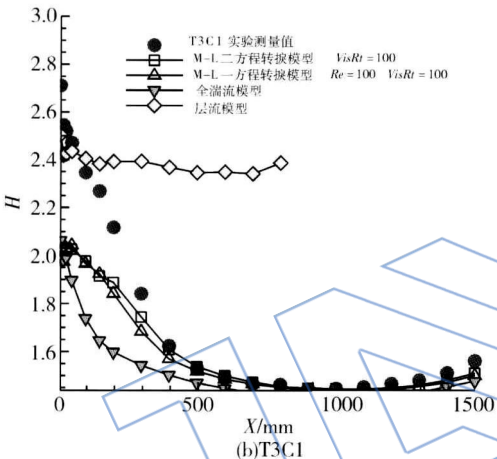
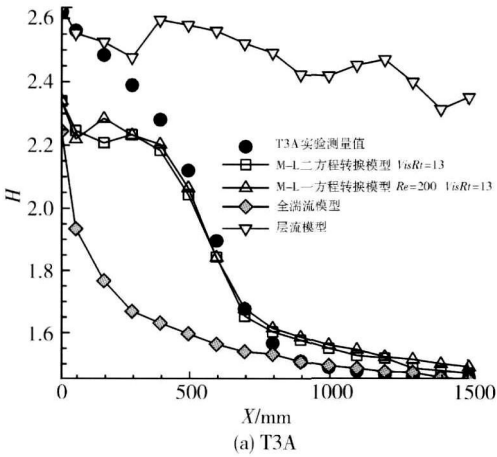


图 4 边界层形状参数分布

Fig. 4 Shape factor distribution of T3C1

从图 2 中使用各模型的计算结果比较可以看出, 应用 M-L 转捩模型能比较准确地捕捉到转捩的始终点和发展过程, 数值模拟的边界层形状参数与实验值吻合较好; 另一方面说明转捩流动的复杂性, 转捩既不等同于湍流也不等同于层流, 因

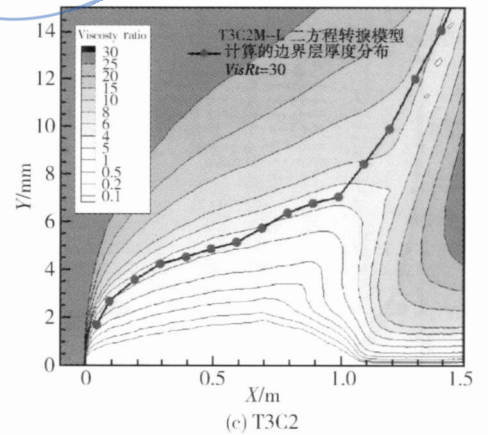
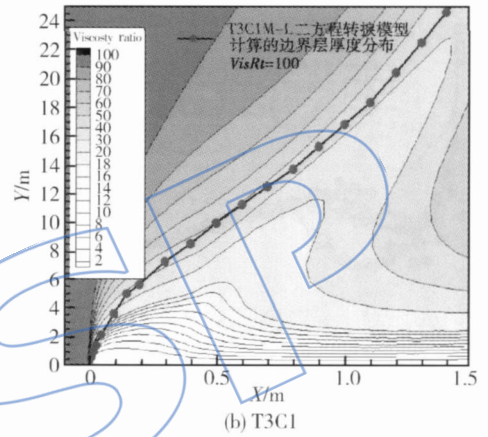
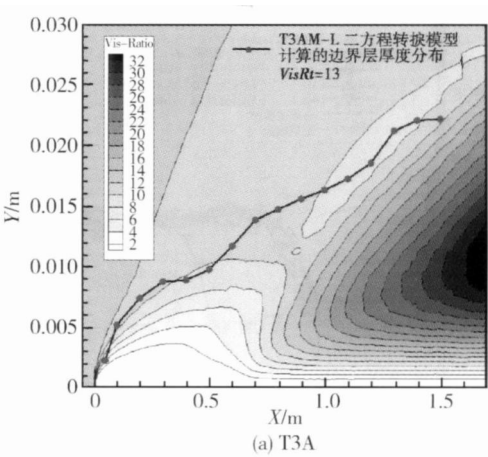


图 5 粘性比分布

Fig. 5 Distribution of viscous ratio

此传统上以全湍流假设的湍流模型来进行研究, 至少会对边界层内的计算产生很大误差, 另外图 2 中使用 M-L 一方程和二方程转捩模型的计算结果与实验值吻合得都很好, 但是 M-L 一方程模型需根据经验预测指定转捩起始动量厚度雷诺数, 而使用 M-L 二方程不需要指定这个参数, 本文是根据文献[6]来选取转捩起始动量厚度雷诺数, M-L 一方程模型的这个经验特性使其影响了通用性. 进口边界的粘性比实际上是衡量自由流

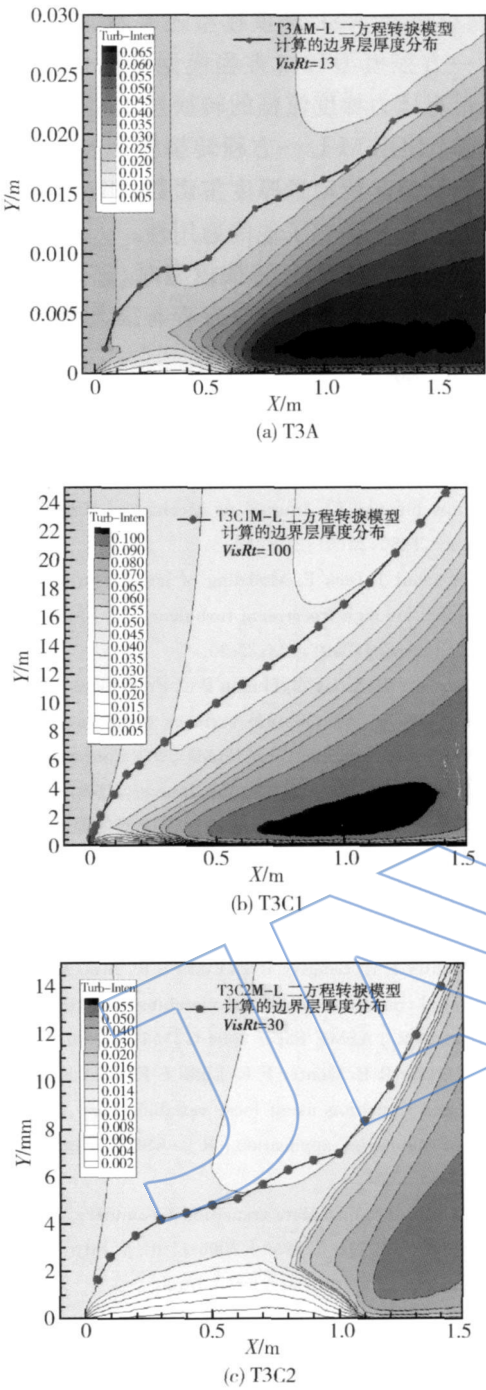


图 6 湍流强度分布
Fig. 6 Distribution of turbulence intensity

湍流特性的值, 并通过输运方程中在流场中传递, 其对于模拟转捩过程有很大的影响, 本文为了说明这个问题, 特意选取多个进口粘性比计算结果进行比较, 计算结果也证实了这个结论, 如图 2 (a) 中零压力梯度 T3A 当进口粘性比取为 13 时, 转捩位置与实验符合最好, 但进口粘性比为 30 时与实验值相差非常悬殊, T3C1 和 T3C2 中也有类似现象. 在图 3 中通过对比可以发现流向各个位置速度分布轮廓线与实验值吻合得较好, 但是相

应的边界层厚度分布与实验值相比误差较大, 这是与其转捩过程的差别密切相关的, 从表 1 可知 T3C1 和 T3C2 进口流速相差不多, 进口湍流度分别为 3% 和 6%, 图 5 (b) T3C1 和图 5 (c) T3C2 显示它们转捩发生的位置和过程都相差很大, T3C2 转捩起始位于与平板前缘约 1 m 处, 转捩长度约为 0.3 m, T3C1 则在距离平板前缘约 0.2 m 处就开始转捩, 其转捩长度也约为 0.3 m, 另外可见 T3C1 与 T3C2 的转捩影响范围大小也相差很大, T3C2 的层流影响区几乎占流场的 2/3, 而 T3C1 的层流区域很小, 整个流场更接近全湍流流场. 这些现象一方面说明在有压力梯度的情况下进口湍流度同样影响转捩的起始位置, 表现为较高的湍流度使得转捩起始动量厚度雷诺数增大 (T3C2 的 $Re_{\theta 1} = 260$, T3C1 的 $Re_{\theta 1} = 100$); 另一方面也证实了目前普遍面临问题——对单一流体状态 (湍流或层流) 的数值模拟能力, 无论是准确性还是通用性, 都要远强于对转捩这种复杂流动的模拟, 在图 4 中单一流体状态 (全湍流或全层流) 的边界层形状参数在转捩前后区域与实验值的吻合度较高就说明了这个问题; 还有就是转捩模型的不完善性的原因, 虽然 M-L 模型的计算比较成功地描述了边界层从层流向湍流转捩流动的复杂过程, 但是由于数值模拟出来的转捩起始点前后区域的流动是一种介于层流和湍流中间的流动状态, 这在图 4 中显示得比较清楚, 所以由于上面三个原因, 对于转捩起始点前后区域的数值模拟还存在较大问题, 与实验值相比有一定的误差, 从而导致边界层厚度在转捩发生前后也与实验值有较大的区别. 值得注意的是对于高湍流度的流动, 使用全湍流模型来计算转捩流场在某些时候误差较小, 如图 2 (b) 中 T3C1 的转捩边界层计算曲线和全湍流边界层计算曲线分布大体一致, 而涡轮通常是工作在高湍流度情况下, 这也许从侧面说明了在工程上采用全湍流模型的计算结果所引起的误差并不是很显著的原因.

从表 1 可知, T3A 与 T3C2 的进口条件大致相同, 他们主要区别是否存在压力梯度, 把图 5 (c) T3C2 与图 5 (a) 的 T3A 对比可知, 由于 T3C2 压力梯度的存在, 转捩起始点向下游推移了大约 0.5 m, T3C2 的转捩长度大约为 0.2 m, 比 T3A 的转捩长度大 0.4 m 小得多; 由图 7 可以看到, 在 $X \leq 0.9$ m 这段区域里, 流动一直是加速, 为顺压梯度, 而在余下区域里开始逐渐减速, 为逆压梯度; 这说明因为顺压梯度抑制转捩的发生, 表现在使得转

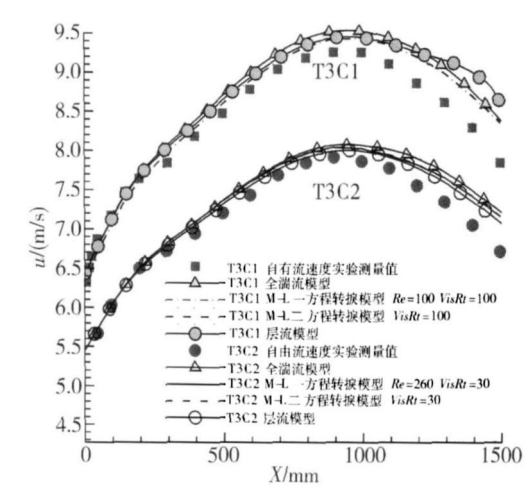


图 7 T3C1 和 T3C2 附面层外 ($Y=0.03\text{ m}$) 自由流速度沿流向分布

Fig. 7 T3C1 and T3C2 distribution of free stream velocity outside the boundary layer ($Y=0.03\text{ m}$)

捩起始动量厚度雷诺数增大(T3C2 的 $Re_{\theta_i} = 260$, T3A 的 $Re_{\theta_i} = 200$), 与之相反, 逆压梯度促进转捩过程的发生, 表现在转捩长度的减小, 这是符合实际物理情况的, 从图 5 和图 6 中可以更详细地看出这种区别, T3C2 的层流边界层被向壁面压缩, 使得湍流扰动的影响被抑制, 转捩随之被向下游推迟. 从图 7 还可以看到, 使用各模型计算的边界层外势流速度大体相同, 与实验值吻合得也很好, 这说明转捩的影响主要存在于壁面边界层中, 而对自由流势流场的影响并不大.

3 结 论

本文通过使用 M-L 转捩模型, 对平板边界层转捩 T3 系列实验进行数值模拟, 得出以下的结论:

(1) 数值模拟结果证实压力梯度对转捩起始位置和过程影响较大;

(2) 虽然 M-L 转捩模型还有不完善之处, 但 M-L 一方程模型和二方程模型都能比较准确地预测带有压力梯度流畅的转捩发生和发展过程;

(3) 使用 M-L 一方程转捩模型时, 需根据经验指定转捩起始动量厚度雷诺数, 相比 M-L 二方程模型是还是影响了他的通用性;

(4) 在使用 M-L 转捩模型时, 进口粘性比的选取对于数值计算的转捩过程有很大的影响.

参考文献:

[1] AbrGhannam B J, Shaw R. Natural transition of boundary layers the effects of turbulence, pressure gradient, and flow history[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1980, 22(5): 213-228.

[2] Steelant J, Dick E. Modeling of laminar-turbulent transitional for high freestream turbulence[J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 123: 22-30.

[3] Suzen Y B, Xiong G, Huang P C. Predictions of transitional flows in low pressure turbines using an intermittency transport equation[C] // Fluids 2000 Conference and Exhibit. AIAA Paper 2000 2654, Denver, USA: 2000.

[4] 顾金生. 不依赖于经验系数的湍流模型初探[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1996.

[5] 郭玉波. 叶轮机内粘性流场的转捩流动数值模拟方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.

[6] Menter F R, Langtry R B, Likki S R, et al. A correlation based transition using local variables Part I Model formulation[R]. ASME Paper 2004 GT-53452, 2004.

[7] Langtry R B, Menter F R, Likki S R, et al. A correlation based transition using local variables Part II- Test cases and industrial application[R]. ASME Paper 2004 GT-53454, 2004.

[8] Coupland J. Flat plate transitional boundary layers experiments[EB/OL]. 1990 [2006 11-01]. <http://cfd.me.umist.ac.uk/ercoftac/classif.html>.