

粗糙壁面诱导的流动转捩数值 模拟方法

李虹杨¹, 郑 赟¹, 刘大响^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 为预测粗糙壁面诱导的流动转捩, 对 Langtry 提出的 $\gamma-Re_\theta$ 转捩模型增加粗糙壁面的比耗散率和涡黏性的边界条件, 并对模型中的经验关联函数——转捩动量厚度雷诺数进行修正, 引入等效沙粒表面粗糙度作为变量, 使模型具有一定的预测粗糙壁面诱导的流动转捩的能力。对粗糙平板自然转捩算例和变压力梯度平板绕流算例进行数值模拟, 计算结果与风洞实验数据符合的较好。主要结论如下: 表面粗糙度一般会增加边界层内的传热系数和阻力系数, 同时使层流到湍流的转捩位置提前; 自然转捩的转捩位置受表面粗糙度影响较大, 与光滑壁面相比, 平板算例中 0.15 mm 的表面粗糙度使转捩位置提前 40%; 分离诱导转捩的转捩位置受表面粗糙度影响较弱, 随着表面粗糙度逐渐增加, 转捩位置和分离泡位置略有后移, 且分离泡强度逐渐减弱, 分离泡之后的阻力系数增加。

关 键 词: 转捩; 表面粗糙度; 边界层; 转捩模型; 间歇因子

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Numerical simulation method of roughness induced transition

LI Hong-yang¹, ZHENG Yun¹, LIU Da-xiang^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: For the purpose of simulating roughness induced transition, the boundary conditions of turbulent dissipation rate and eddy viscosity for rough surface were added to Langtry's $\gamma-Re_\theta$ transition model; furthermore, equivalent sand surface roughness height was introduced to rewrite the correlation equations of the transition momentum thickness Reynolds number, making it appropriate for roughness-induced transition. Numerical simulation was made by referring to the wind tunnel data of several rough flat plate experiments and variable-pressure-gradient plate experiment, in which the results were satisfactory. Main conclusions are made as follows: surface roughness will enhance the heat transfer, increase the skin friction coefficient and shift the transition position upstream in general compared with smooth cases; effects for natural transition is significant, as surface roughness of 0.15 mm could shift the transition position upstream about 40%; while affect for separating induced transition is weaker; with the increase of surface roughness, transition position and separating bubble position are shifted backwards a little, the strength of separating bubble becomes weaker while the friction coefficient increases.

收稿日期: 2014-12-23

作者简介: 李虹杨(1989—), 男, 辽宁凌源人, 博士生, 研究领域为流热耦合数值模拟、转捩预测及仿真。

E-mail: buaalihy@hotmail.edu.cn

Key words: transition; surface roughness; boundary layer;
transition model; intermittency factor

随着航空发动机技术的不断进步,热端部件的工作条件日益严苛,这对发动机涡轮级的设计也提出了更高的要求.流动边界层转捩对涡轮级的气动、传热特性有着相当大的影响,因此转捩的预测十分重要^[1-3].转捩过程受到的影响因素众多,如自由流湍流度、压力梯度、当地雷诺数、流线曲率、温度等^[4],而其中一个重要的影响因素就是表面粗糙度^[5].发动机的涡轮部件工作周期内会受到积垢沉淀、侵蚀、腐蚀氧化等各种因素的影响^[6],涡轮叶片的表面粗糙度可以达到“过渡粗糙”甚至“完全粗糙”的量级^[7-8],这对边界层转捩有着直接影响. Turner, Boyle 和 Stripf 等^[9-12]对粗糙平板的边界层转捩现象进行了研究,发现粗糙壁面有如下两个主要作用:①增加边界层内的传热系数和阻力系数;②使层流到湍流的转捩位置提前.粗糙壁面诱导的流动转捩可能使同一位置的传热系数增大 10 倍以上^[13].

现阶段基于求解雷诺平均(Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)方法的数值模拟仍是工程计算的主要方法.众多转捩预测方法中应用比较广泛的是基于间歇因子输运方程的转捩模型方法,如 Suzen 和 Huang^[14]发展的三方程模型,以及 Walters, 符松等^[15-16]提出的转捩模型.其中 Langtry 和 Menter^[17]于 2004 年提出的 γ - Re_θ 转捩模型受到了广泛的关注,该模型在低速流动的转捩预测中有着较高的精度^[18-19],对于高超声速流动的转捩预测的结果也比较理想^[20-21].

许多学者基于 RANS 方法,尤其是间歇因子输运方程方法,对粗糙壁面诱导的流动转捩的数值模拟方法进行了相关研究. Stripf 等^[22-23]将离散单元表面粗糙度(discrete element surface roughness)模型^[24-25]与两层(two-layer) k - ϵ 模型进行结合,模拟了粗糙壁面的边界层转捩,并与某低压涡轮导叶的实验数据进行对比. Boyle 等^[26]针对不同的粗糙单元的几何形状提出一种等效沙粒表面粗糙度(equivalent sand grain surface roughness)计算方法,并进行了实验验证. Lorenz 等^[27]在 Stripf 工作的基础上提出了新的表面粗糙度准则公式并将其与湍流模型相结合,使计算结果与实验值吻合得更好. XIAO Zhixiang 等^[28]利用三方程的 k - ω - γ 转捩模型研究高超声速流动中孤立粗糙单元的效应,探讨粗糙单元的几何形

状对边界层转捩的影响.

已公开发表的文献中均鲜有在 γ - Re_θ 转捩模型的基础上考虑表面粗糙度的影响,且表面粗糙度(特别是“过渡粗糙”)对边界层转捩的影响程度还不明确.本文在 Stripf, Hellsten 等^[22,29]的工作的基础上,提出了针对 γ - Re_θ 转捩模型的表面粗糙度的修正公式,使用了粗糙壁面的比耗散率 ω 和涡黏性 μ_t 的边界条件,并改进了转捩模型中的经验关联函数,使该模型可以用于预测粗糙壁面诱导的流动转捩.粗糙平板自然转捩流动的数值模拟表明,随着表面粗糙度的增加,转捩位置有很大程度的提前,且计算结果与风洞实验数据吻合得较好;变压力梯度平板绕流算例表明,表面粗糙度会影响分离区长度、分离泡的强弱以及湍流区的阻力系数.

1 数值方法

1.1 基础的 γ - Re_θ 转捩模型

γ - Re_θ 转捩模型有两个输运方程^[17],转捩动量厚度雷诺数($\widetilde{Re}_\theta$)的输运方程如下:

$$\frac{\partial(\rho \widetilde{Re}_\theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \widetilde{Re}_\theta)}{\partial x_j} = P_\theta + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\theta (\mu + \mu_t) \frac{\partial \widetilde{Re}_\theta}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

在边界层外,源项 P_θ 驱动流场中输运量 $\widetilde{Re}_\theta$ 的变化使其等于当地变量 Re_θ ,而当地的 Re_θ 是由经验关联公式得到.边界层内 $\widetilde{Re}_\theta$ 由边界层外扩散得到,由输运方程(式(1))控制.

另一个输运方程则是间歇因子输运方程,定义如下:

$$\frac{\partial(\rho \gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \gamma u_j)}{\partial x_j} = \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\gamma \mu_t) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] + P_\gamma - E_\gamma \quad (2)$$

式中 P_γ 为控制间歇因子增长的源项.

$$P_\gamma = c_{al} F_{length} \rho S (\gamma F_{onset})^{1/2} (1 - c_{el} \gamma) \quad (3)$$

式中 F_{length} 为控制转捩区长度; F_{onset} 为控制转捩起始点,它们都是转捩动量厚度雷诺数 $\widetilde{Re}_\theta$ 的函数.这些变量用于控制歇因子的分布,进而控制边界层转捩.输运方程的破坏项定义如下:

$$E_\gamma = c_{a2} F_{\text{turb}} \rho \Omega \gamma (c_{e2} \gamma - 1) \quad (4)$$

该项的作用是保证间歇因子在边界层的层流区接近零,同时也使模型具备预测湍流再层流化的能力。

上述的两个输运方程用于求解流场中间歇因子的分布,最终间歇因子用于控制湍流的生成项、破坏项以及混合函数来模拟转捩。上述方程需要与原始的湍流模型相结合,Langtry 和 Menter 推荐 $k-\omega$ SST (shear stress transport) 模型,具体实现方法请参考文献[17,30-31]。

1.2 Hellsten 和 Stripf 的表面粗糙度修正

为模拟表面粗糙度对湍流边界层的影响,Hellsten 等[29]提出了对全湍流的 $k-\omega$ SST 模型的表面粗糙度修正方法,该方法分为两个部分。

壁面处湍动能 k 的比耗散率 ω 设为有限值取代原始模型中的无穷大,公式为

$$\omega_w = \frac{u_\tau^2}{\nu} S_\tau \quad (5)$$

式中 u_τ 为摩擦速度 $\sqrt{\tau_w/\rho}$, S_τ 为无量纲的系数。

$$S_\tau = (50/k_s^+)^2 \quad k_s^+ \leq 25 \quad (6)$$

$$S_\tau = (100/k_s^+) \quad k_s^+ > 25 \quad (7)$$

式中 k_s^+ 为无量纲的表面沙粒粗糙度。

$$k_s^+ = \frac{u_\tau k_s}{\nu} \quad (8)$$

式中 k_s 为等效沙粒表面粗糙度。还需要在 $k-\omega$ SST 模型的涡黏性表达式中增加一个掺混函数 F_3 ,形式为

$$\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega; |\Omega| F_2 F_3)} \quad (9)$$

$$F_3 = 1 - \tanh\left[\left(\frac{150\nu}{\omega d^2}\right)^4\right] \quad (10)$$

为了模拟表面粗糙度对转捩位置的影响,Stripf 等[13,22]重新定义了一个动量厚度雷诺数 $Re_{\theta_t, \text{rough}}$,该变量是表面粗糙度高度 k_s 和边界层位移厚度 δ^* 的函数

$$Re_{\theta_t, \text{rough}} = Re_{\theta_t} \quad k_s/\delta^* \leq 0.01$$

$$Re_{\theta_t, \text{rough}} = \left[\frac{1}{Re_{\theta_t}} + 0.0061 f_\Lambda \left(\frac{k_s}{\delta^*} - 0.01 \right) \right]^{f_{\sigma_{tu}}} \quad k_s/\delta^* > 0.01 \quad (11)$$

$$f_{\sigma_{tu}} = \max[0.9; 1.61 - 1.15 \exp(-\sigma_{tu})] \quad (12)$$

式中 σ_{tu} 是当地自由流湍流的函数, f_Λ 用于描述粗糙单元拓扑结构的影响, $f_\Lambda=1$ 则表征某给定的粗糙单元高度所能产生的最大表面粗糙度效应[23]。本文研究的重点不在于粗糙单元的拓扑结

构的影响,因此令 $f_\Lambda=1$ 。

1.3 考虑粗糙表面的转捩模型

首先,考虑表面粗糙度对湍流边界层的影响。 $\gamma-Re_\theta$ 转捩模型是在 $k-\omega$ SST 模型的基础上实现的,其中的 k 输运方程和 ω 输运方程的形式与后者基本一致。本文将 Hellsten 等对 $k-\omega$ SST 模型的表面粗糙度修正方法引入到 $\gamma-Re_\theta$ 转捩模中。该方法模拟的边界层转捩点后(湍流区域)的阻力系数与 Mills-Hang 的经验公式[29]符合得很好。

其次,模型还需要考虑表面粗糙度对边界层转捩点位置的影响。 $\gamma-Re_\theta$ 转捩模型中有两个构成转捩触发准则的变量,其一是转捩动量厚度雷诺数 Re_{θ_t} ,另一个是涡量雷诺数 Re_ω ,前者是基于经验关联而后者是由流场中当地变量计算得到。转捩模型中的临界转捩动量厚度雷诺数 Re_{θ_t} ,以及 F_{onset} 和 F_{length} 等均是 Re_{θ_t} 和 Re_ω 的函数[30-31]。由于原始模型中 Re_{θ_t} 的经验关联公式均基于低速光滑平板的实验数据,那么参考粗糙平板转捩流动的实验数据对 Re_{θ_t} 的表达式进行修正,使模型具备粗糙壁面诱导的流动转捩的预测能力是可行的。

转捩动量厚度 θ_t 以及转捩动量厚度雷诺数 Re_{θ_t} 等原则上是流场中的全局变量,需要整个流场的边界层和自由流信息,而 Langtry 的 $\gamma-Re_\theta$ 模型中通过建立了当地转捩动量厚度雷诺数的输运方程,使 Re_{θ_t} 成为流场中的分布量。本文参考 Langtry 的思路,引入当地位移厚度,建立了式(11)~式(12)中边界层位移厚度 δ^* 和当地流动参数的关系,结合 Re_{θ_t} 的输运方程得到当地位移厚度在流场中的分布,进而得到考虑粗糙壁面的当地转捩动量厚度雷诺数 $Re_{\theta_t, \text{rough}}$ 。

$\gamma-Re_\theta$ 模型经验关联式(14)的求解中,由于等号两端均含有转捩动量厚度 θ_t (当地变量),需要进行迭代求解[17]

$$Re_{\theta_t} = \frac{\rho \theta_t U}{\mu} \quad (13)$$

$$Re_{\theta_t} = G(\sigma_{tu}) F(\lambda_\theta) \quad (14)$$

得到流场中转捩动量厚度 θ_t 后,根据速度剖面的 N 次方定律[32]估算出位移厚度 δ^*

$$\frac{U}{U_e} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (15)$$

$$\frac{\delta^*}{\delta} = \frac{1}{1+n} \quad (16)$$

$$\frac{\theta}{\delta} = \frac{n}{(1+n)(2+n)} \quad (17)$$

式中 δ 为边界层厚度; n 为常数,一般取为 7,结合

式(11)即可得到流场中 $Re_{\theta, rough}$ 的分布。

Langtry 的 $\gamma-Re_{\theta}$ 转捩模型以及上述修正方法在自行开发的 CFD 程序 HGFS 软件上实现, 该程序的空间离散采用基于非结构化网格的有限体积法, 对流通量采用 Roe 的迎风格式, 黏性通量采用中心格式, 时间推进为全隐式格式, 该程序的验证可参见文献[20, 33-34]。

2 结果验证与分析

2.1 粗糙平板的转捩预测

粗糙平板转捩预测算例参照了 Wang, Pinson 等的风洞实验^[35-36], 计算采用二维结构化网格, 单元总数约为 87 000, 第 1 层网格高度为 10 μm , y^+ 范围在 0.2~0.4 之间。

光滑平板与粗糙平板绕流的算例的边界条件分别如表 1 和表 2 所示。表中 U_{∞} 为来流速度, T_{∞} 为来流温度, σ_u 为自由流湍流度 (free stream turbulence intensity), Re_{∞} 为来流雷诺数。

表 1 光滑平板算例的边界条件

Table 1 Parameters for smooth flat plate cases

算例	$U_{\infty}/$ (m/s)	T_{∞}/K	$\sigma_u/\%$	$Re_{\infty}/10^5 \text{ m}^{-1}$
S1	4.6	288.15	0.2	3.1
S2	4.6	288.15	3.3	3.1
S3	4.6	288.15	5.0	3.1
S4	8.6	288.15	0.5	5.8

表 2 粗糙平板算例的边界条件

Table 2 Parameters for rough flat plate cases

算例	$U_{\infty}/$ (m/s)	T_{∞}/K	$\sigma_u/\%$	$Re_{\infty}/$ 10^5 m^{-1}	k_s/mm
R1	4.6	288.15	5.2	3.1	0.4
R2	8.6	288.15	0.5	5.8	0.15

数值模拟的光滑平板绕流 (算例 S1~算例 S3) 的 Stanton 数与实验值的对比如图 1 所示, 图中实体符号为实验值, 虚线表示全层流和全湍流状态下的解析解^[35], 带符号的实线表示本文模型计算得到的数值解。在 $U_{\infty}=4.6 \text{ m/s}$, $\sigma_u=0.4\%$ 时, 边界层没有发生转捩, 计算得到的 Stanton 数与实验值和层流理论解一致。当 σ_u 增大到 4.1% 和 5.9% 时, 边界层发生转捩, 数值计算得到的转

捩起始点、转捩区长度均与实验值符合得很好, 说明本文程序对光滑平板自然转捩的预测是准确的。

算例 R2 (粗糙平板) 和算例 S4 (光滑平板) 的计算结果如图 2 所示, 可以看出两种情况下的边界层均发生了转捩, 但粗糙平板的转捩位置更为提前。本文程序的计算结果趋势正确, 转捩位置和转捩区长度预测得也比较准确, 但对粗糙平板的转捩起始点分辨率不够高, 层流边界层过早呈现过渡态的趋势。

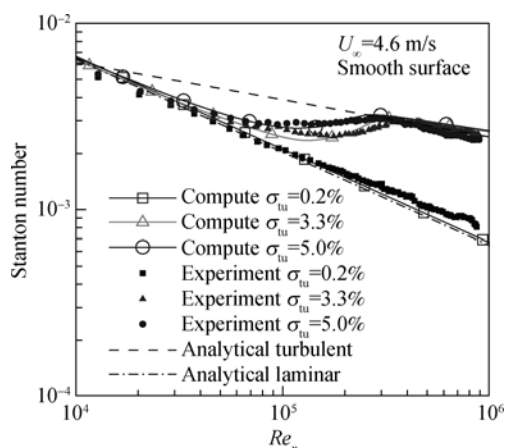


图 1 光滑平板的转捩预测 (算例 S1~算例 S3)
Fig. 1 Transition prediction of smooth flat plate
(case S1~case S3)

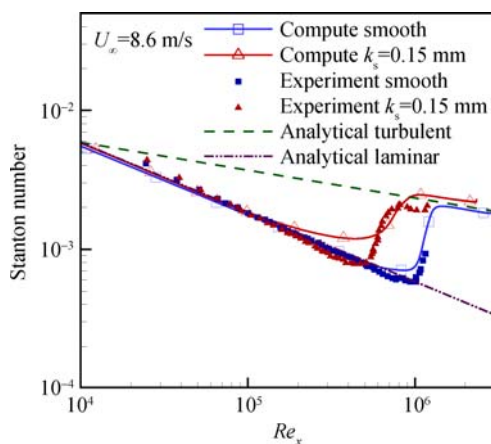


图 2 粗糙平板的转捩预测 (算例 R2, 算例 S4)
Fig. 2 Transition prediction of rough flat plate
(case R2, case S4)

增加了表面粗糙度的算例 R1 与对照算例 S3 的计算结果如图 3 所示。由于来流湍流度较大, 边界层转捩位置靠前 (接近平板前缘), 转捩点为 $Re_x=3 \times 10^4$ 。光滑平板的计算结果与实验值符合的比较好, 转捩位置和转捩区长度预测的基本准

确. 粗糙壁面会使边界层转捩位置进一步提前, 实验结果和程序的计算结果都很好的反应了该现象. 数值模拟的转捩位置比较准确, 但转捩区长度要短于实验结果. 这主要是由于本算例的转捩点靠近平板前缘, 网格分辨率不足; 而且 $k_s = 0.4$ mm 的表面粗糙度非常高, 本文的修正公式可能需要进一步完善, 以提高适用范围.

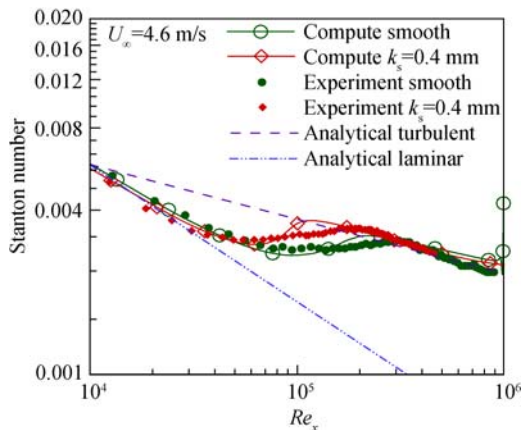


图3 粗糙平板的转捩预测(算例 R1, 算例 S3)

Fig. 3 Transition prediction of rough flat plate (case R1, case S3)

2.2 变压力梯度平板的转捩预测

分离诱导转捩是边界层受到分离泡的强扰动而引起的转捩, 一般而言转捩位置相对固定, 但转捩区长度、转捩前后压力系数、阻力系数等会仍受到表面粗糙度等因素的影响. 本文对变压力梯度的平板绕流算例进行数值模拟, 压力梯度由平板上方的光滑曲面提供, 曲面的轮廓曲线来自某高负荷涡轮叶形(如图4所示), 实验由 LOU Weiliang 等^[37]完成.

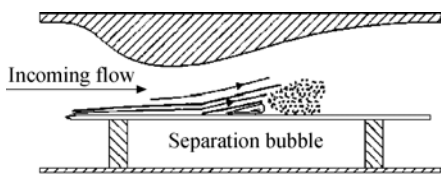


图4 变压力梯度平板绕流实验示意图^[37]

Fig. 4 Schematic diagram of the experiment section of the variable pressure gradient flow across the flat plate^[37]

计算的边界条件如下: $U_\infty = 9.0$ m/s, $\sigma_w = 0.6\%$, $T_\infty = 288$ K, $Re_\infty = 6.2 \times 10^5$ /m, 平板总长 $L = 1.0$ m, 选择了两组表面粗糙度进行计算, 分别是 $k_s = 0.2$ mm 和 $k_s = 0.4$ mm. 结构化网格单

元总数约为 23000, 保证壁面的 $y^+ < 0.2$.

计算得到的间歇因子与流线分布如图5所示, 间歇因子分布反应了转捩位置(约为 $x = 0.47$ m), 流线图反应了分离泡位置($x = 0.43 \sim 0.50$ m 范围), 转捩发生在分离泡中心附近的位置. 本算例中表面粗糙度对分离泡位置及转捩位置影响不大, 不同表面粗糙度平板对应的间歇因子分布和流线分布基本一致.

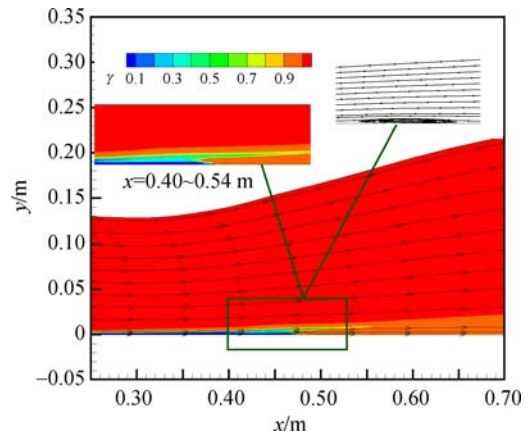


图5 间歇因子与流线的分布

Fig. 5 Distribution of the intermittency factor and stream lines

不同表面粗糙度平板算例对应的压力系数(C_p)如图6所示, 其中带空心符号的实线为本模型的计算结果, 虚线为 $k-\omega$ SST 模型的计算结果, 实心符号为实验结果, 可以看出 $k-\omega$ SST 模型计算得到的压力系数整体高于实验值, 而且没有捕捉到分离区($x/L = 0.43$ 附近)的压力变化, 而转捩模型的结果与实验值符合的更好, 且分离区位置与实验结果基本一致; 另一方面, 转捩模型的计算结果中光滑壁面的分离泡最强, 对壁面压力的影响最大, 而随着表面粗糙度的增加其影响逐渐减弱.

不同表面粗糙度平板计算得到的阻力系数(C_f)如图7所示. 图中可以看出 $k-\omega$ SST 模型与转捩模型的结果有较大差别, 平板前半段(分离区之前)更为明显, 这是因为该部分边界层为层流, 全湍流模型计算得到的阻力系数会偏大; 另一方面, 可以看出表面粗糙度只对湍流边界层有影响, 而层流区域的阻力系数几乎一致; 同时, 随着表面粗糙度的增加(光滑壁面即 $k_s = 0.2, 0.4$ mm), 分离泡位置略有延后($x/L = 0.42 \sim 0.44$ 的位置), 强度逐渐减弱, 但分离泡之后的阻力系数最大值有所增加(C_f 由 0.03 增加到 0.04).

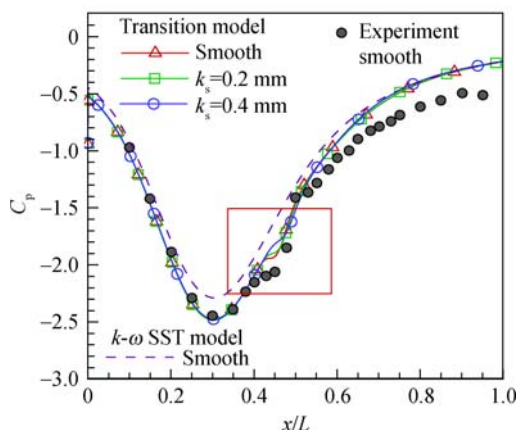


图6 压力系数的对比

Fig. 6 Comparison of pressure coefficient

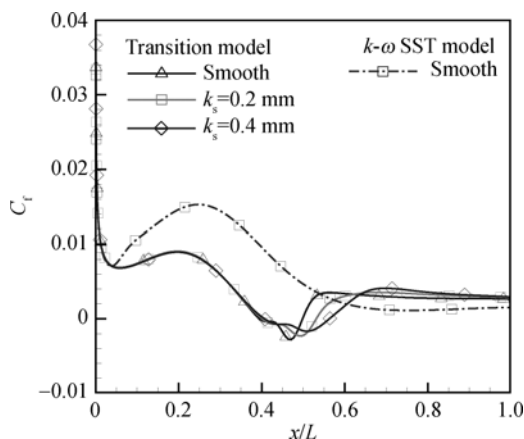


图7 阻力系数的对比

Fig. 7 Comparison of friction coefficient

3 结论

为使 Langtry 的 $\gamma-Re_\theta$ 模型具备预测粗糙壁面诱导的流动转捩的能力,本文使用了粗糙壁面的比耗散率 ω 和涡黏性 μ_t 的边界条件,并引入等效沙粒表面粗糙度 k_s 作为变量,对模型中转捩动量厚度雷诺数 Re_θ 的经验关联公式进行修正;利用不同表面粗糙度平板的流动转捩预测算例和变压力梯度的平板绕流算例对本文模型进行验证。主要结论如下:

1) 与光滑壁面相比,粗糙壁面一般会使传热系数和阻力系数增加,同时使转捩位置提前。本文算例中,0.15 mm 和 0.20 mm 左右的表面粗糙度可以使平板绕流的边界层转捩位置提前 40%,并且使阻力系数增大 16%。

2) 对于分离诱导转捩,表面粗糙度一般不会对转捩位置产生很大影响,本文计算结果表明,随着表面粗糙度的增加,分离位置略有延后(从

$x/L=0.42\sim0.44$),分离泡强度减弱,但分离区后阻力系数的最大值有一定程度的增加(由 0.03 增加到 0.04)。

3) 为模拟粗糙壁面诱导的流动转捩现象,根据粗糙平板的实验结果对 $\gamma-Re_\theta$ 模型的经验关联公式进行修正或重新定义是可行的,但还需要更为详细、具体的实验数据(如来流的涡黏比、边界层转捩动量厚度、位移厚度等),对于该方法在复杂流动中的应用也需要进一步探究。

参考文献:

- [1] Walker G J. The role of laminar-turbulent transition in gas turbine engines; a discussion[J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115(2): 207-216.
- [2] Lorenz M, Schulz A, Bauer H J. Predicting rough wall heat transfer and skin friction in transitional boundary layers; a new correlation for bypass transition onset[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(4): 819-832.
- [3] Langtry R B, Menter F R. Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes[J]. AIAA Journal, 2009, 47(12): 2894-2906.
- [4] Abu-Ghannam 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.
- [5] Roberts S K, Yaras M I. Boundary-layer transition over rough surfaces with elevated free-stream turbulence[R]. ASME Paper GT2004-53668, 2004.
- [6] 李本威, 李冬, 沈伟, 等. 涡轮叶片粗糙度对其性能衰退的影响研究[J]. 航空计算技术, 2009, 39(5): 26-29.
LI Benwei, LI Dong, SHEN Wei, et al. Research on turbine lamina roughness influence on its performance declination [J]. Aeronautical Computing Technique, 2009, 39(5): 26-29. (in Chinese)
- [7] Bogard D G, Schmidt D L, Tabbita M. Characterization and laboratory simulation of turbine airfoil surface roughness and associated heat transfer[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(2): 337-342.
- [8] Bons J P, Taylor R P, McClain S T, et al. The many faces of turbine surface roughness[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(4): 739-748.
- [9] Turner A B, Tarada F H A, Bayley F J. Effects of surface roughness on heat transfer to gas turbine blades[R]. AGARD-CP-390, 1985.
- [10] Boyle R J. Infrared low temperature turbine vane rough surface heat transfer measurements[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 168-177.
- [11] Boyle R J, Stripf M. Simplified approach to predicting rough surface transition[J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131(4): 1345-1357.

- [12] Stripf M, Schulz A, Bauer H J. Surface roughness and secondary flow effects on external heat transfer of a HP turbine vane[J]. ISABE 2005-1116, 2005.
- [13] Stripf M, Schulz A, Bauer H J. Modeling of rough-wall boundary transition and heat transfer on turbine airfoils[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(2): 1139-1151.
- [14] Suzen Y B, Huang P G. An intermittency transport equation for modeling flow transition[R]. AIAA-2000-0287, 2000.
- [15] Walters D K, Leylek J H. A new model for boundary-layer transition using a single-point RANS approach[J]. Journal of Turbomachinery, 2004, 126(1): 193-202.
- [16] 符松, 王亮. 基于雷诺平均方法的高超音速边界层转捩模拟[J]. 中国科学: G 辑, 2009, 39(4): 617-626.
FU Song, WANG Liang. Simulation of hypersonic boundary-layer transition based on Reynolds-average method[J]. Science in China: G Mathematics, 2009, 39(4): 617-626. (in Chinese)
- [17] Langtry R B, Menter F R. Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes[J]. AIAA Journal, 2004, 42(12): 2894-2906.
- [18] Yoshiara T, Sasaki D, Nakahashi K. Conjugate heat transfer simulation of cooled turbine blades using unstructured-mesh CFD solver[R]. AIAA-2011-498, 2011.
- [19] Khayat-zadeh P, Nadarajah S. Laminar-turbulent flow simulation for wind turbine profiles using the γ - Re_{θ} transition model[J]. Journal of Wind Energy, 2014, 17(6): 901-918.
- [20] 郑赞, 李虹杨, 刘大响. γ - Re_{θ} 转捩模型在高超声速下的应用及分析[J]. 推进技术, 2014, 35(3): 296-304.
ZHENG Yun, LI Hongyang, LIU Daxiang. Application and analysis of γ - Re_{θ} transition model in hypersonic flow[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(3): 296-304. (in Chinese)
- [21] ZHANG Xiaodong, GAO Zhenghong. A numerical research on a compressibility-correlated langtry's transition model for double wedge boundary layer flows[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(3): 249-257.
- [22] Stripf M, Schulz A, Bauer H J, et al. Extended models for transitional rough wall boundary layers with heat transfer: Part I model formulations[R]. ASME Paper GT2008-50494, 2008.
- [23] Stripf M, Schulz A, Bauer H J, et al. Extended models for transitional rough wall boundary layers with heat transfer: Part II model validation and benchmarking[R]. ASME Paper GT2008-50495, 2008.
- [24] Taylor R P, Coleman H W, Hodge B K. A discrete element prediction approach for turbulent flow over rough surfaces[R]. Mississippi State University Report TFD-84-1, 1984.
- [25] Taylor R P, Coleman H W, Hodge B K. Prediction of turbulent rough-wall skin friction using a discrete element approach[J]. Journal of Fluids Engineering, 1985, 107(2): 251-257.
- [26] Boyle R J, Stripf M. Simplified approach to predicting rough surface transition[J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131(4): 819-832.
- [27] Lorenz M, Schulz A, Bauer H J. Predicting rough wall heat transfer and skin friction in transitional boundary layers: a new correlation for bypass transition onset[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 135(4): 819-832.
- [28] XIAO Zhixiang, ZHANG Minghua, FU Song. Studies of roughness-induced transition using three-equation k - ω - γ transition/turbulence model[R]. AIAA-2013-3111, 2013.
- [29] Hellsten A, Seppo L. Extension of the k - ω SST turbulence model for flows over rough surfaces[J]. AIAA 97-3577, 1997.
- [30] Menter F R, Langtry R, Völker S. Transition modelling for general purpose CFD codes[J]. Flow Turbulence and Combustion, 2006, 77(1/2/3/4): 277-303.
- [31] Langtry R B. A correlation-based transition model using local variables for unstructured parallelized CFD codes. [D]. Stuttgart, Germany: University of Stuttgart, 2006.
- [32] 陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [33] 郑赞. 基于非结构网格的气动弹性数值方法研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(9): 2069-2077.
ZHENG Yun. Computational aero-elasticity with an unstructured grid method[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 2069-2077. (in Chinese)
- [34] 肖大启, 郑赞, 杨慧. 轴向间距对转子叶片气动激励的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2307-2313.
XIAO Daqi, ZHENG Yun, YANG Hui. Effect of axial spacing on aerodynamic excitation of rotor blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2307-2313. (in Chinese)
- [35] Wang T, Matthew C R. Effect of elevated free-stream turbulence on transitional flow heat transfer over dual-scaled rough surfaces[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(4): 393-403.
- [36] Pinson M W, Wang T. Effect of two-scale roughness on boundary layer transition over a heated flat plate: Part II boundary layer structure[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(2): 308-316.
- [37] LOU Weiliang, Jean H. Separation bubbles under steady and periodic-unsteady main flow conditions[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 22(4): 634-643.

(编辑: 叶青)