

文章编号:1000-8055(2012)12-2805-09

变工况下超高负荷低压涡轮叶片 边界层被动控制

张 波^{1,2}, 李 伟^{1,2}, 卢新根², 朱俊强²

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100190;

2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190)

摘 要: 以某超高负荷低压涡轮叶型为研究对象, 利用数值模拟的方法通过改变来流雷诺数、自由来流湍流强度和攻角等工况, 研究了其对叶片边界层特性的影响, 并通过在叶片吸力面加凹槽、矩形拌线、圆形拌线等被动控制方式来改善叶型性能。结果表明: 随着雷诺数的增大叶型损失逐渐降低; 随着自由来流湍流强度的增加叶型损失先减小后增大; 随着攻角向负攻角方向变大叶型损失先减小后增大, 向正攻角方向变大时叶型损失迅速增大; 在雷诺数和湍流强度变化时表面凹槽的控制方式较好, 而攻角变化时加矩形拌线和圆形拌线的控制方式较好。3 种被动控制方式促发转捩提前发生抑制分离泡, 但都会引起湍流湿面积的增加。

关 键 词: 超高负荷; 低压涡轮叶片; 雷诺数; 湍流强度; 被动控制

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Ultra-high-lift low-pressure turbine blade boundary layer passive control in different flow conditions

ZHANG Bo^{1,2}, LI Wei^{1,2}, LU Xin-gen², ZHU Jun-qiang²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Effects of Reynolds numbers, free stream turbulence intensities (FSTI) and angle of attack on the steady boundary layer development of an ultra-high-lift low-pressure turbine blade were investigated. The three different types of passive separation control devices, which were dimple, cylindrical wire and rectangular trip, were investigated to further improve the blade performance. Numerical simulation results show that: as the Reynolds increases the profile loss decreases; as the FSTI increases, the profile loss decreases, and then increases; as the attack angle increases in the negative direction, the profile loss decreases, and then increases; as the attack angle increase in the positive direction, the profile loss increases rapidly; when the Reynolds number and the FSTI changes, it is found that the dimple can suppress the separation bubble better and when the attack angle changes, it is found that the wire and strip can suppress the separation bubble better. It is also found that the three passive control methods hasten the transition process so the separation is suppressed, but it increases the turbulent wetted area.

收稿日期: 2011-11-23

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121218.0859.201212.2805_025.html

基金项目: 国际科技合作项目(2010DFB70620); 国家自然科学基金(51176187)

作者简介: 张波(1983—), 男, 河南驻马店人, 硕士生, 主要从事叶轮机械内部流动控制研究。

Key words: ultra-high-lift; low-pressure turbine blade; Reynolds number; free stream turbulence intensity; passive flow control

现代高涵道比的航空发动机低压涡轮的质量占整个发动机质量的 1/3, 许多设计者通过降低低压涡轮的质量来提高发动机的推质比, 进而降低发动机的生产成本和巡航耗油率. 发展高负荷的低压涡轮叶片, 减少低压涡轮叶片数及级数是民用航空发动机的关键技术之一, 罗·罗公司 (Rolls-Royce) 为 A380 研制的遑达 900 的 5 级低压涡轮采用了先进的高负荷低压涡轮叶片^[1]. 负荷的提高意味着低压涡轮叶片局部逆压力梯度的提高, 在低雷诺数的工况下边界层在叶片吸力面发生分离, 叶片吸力面的分离损失占叶型损失的 60%^[2], 减小分离泡降低叶型损失成为目前的研究热点. Bons 等^[3-4]和 Volino^[5]用定常或脉冲的涡流发生器来减小高负荷低压涡轮叶片吸力面的分离泡, 但这种主动控制方式造价高, 工程界更趋向于简单易行、成本较低的被动控制方式. Lake 等^[6]研究了定常来流低雷诺数下通过在高负荷低压涡轮叶片吸力面加球窝、V 型槽及拌线等来降低叶型损失, 但并没有给出这些被动控制方式的优化. Volino^[7]通过在高负荷低压涡轮叶片上加矩形拌线来减小分离泡, 并给出矩形拌线的最优位置在速度峰值点附近, 并指出拌线并不能阻止流动分离而是促进转捩在分离剪切层中提前发生. ZHANG 等^[8-10]通过在超高负荷低压涡轮叶片加各种形式的拌线来控制边界层的发展, 给出拌线的最优加载位置是速度峰值点与分离点中点. Robarge 等^[11]给出了凹陷处理的最佳深度为前缘位置处边界层厚度的 0.6~0.8 倍, 最佳凹陷深宽比为 0.10~0.15. 这些研究的工况范围较窄, 并不能完全模拟发动机实际工作时的流动状况, 如飞机在起飞、巡航、降落的过程中引起的低压涡轮雷诺数、攻角、来流湍流度等的变化, 这就需要对变雷诺数、自由来流湍流强度、攻角下高负荷低压涡轮叶片的性能进行研究, 及以上被动控制方式是否依然有效地减小分离泡, 降低叶型损失.

在以上研究的基础上, 以某典型的超高负荷低压涡轮叶型为研究对象, 采用商用软件 ANSYS CFX 11.0 对变雷诺数、自由来流湍流强度、攻角等来流工况下, 给出利用 ZHANG^[8-10], Robarge 等^[11]的研究结论优化后的凹槽、圆形拌线、矩形拌线对叶型损失的影响, 深入探讨了这些被

动控制方式减小损失的控制机制.

1 研究对象与数值模拟方法

研究对象为中国科学院工程热物理研究所自行设计的 IET-LPTF 超高负荷前加载低压涡轮叶型, 其 Zweifel 载荷系数 Z 为 1.36, Z 的定义如下:

$$Z = 2s/B_x \cdot \cos^2 \alpha_2 \cdot [(u_1/u_2) \tan \alpha_1 + \tan \alpha_2] \quad (1)$$

其中 u_1, u_2 分别为进出口轴向速度; s 为栅距; B_x 为轴向弦长; α_1, α_2 为几何进出口气流角. 其展弦比为 2.38, 此叶型的气流转折角为 95°, 叶型主要几何具体参数见表 1.

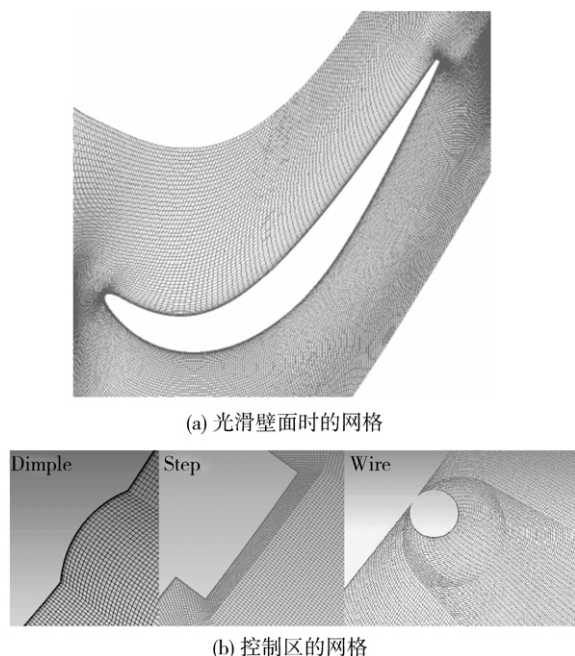
表 1 IET-LPTF 叶型主要参数
Table 1 Details of IET-LPTF profile

叶型参数	数值
弦长 B/mm	42.1
轴向弦长 B_x/mm	37.7
栅距 s/mm	42.1
叶高 $/\text{mm}$	100
几何进气角 $\alpha_1/(\circ)$	35.0
几何出气角 $\alpha_2/(\circ)$	60.0
安装角 $\gamma/(\circ)$	25.9
Zweifel 系数 Z	1.36

数值模拟采用 CFX 商用计算软件求解三维定常黏性雷诺平均 Navier-Stokes 方程. 针对低压涡轮边界层的分离转捩现象, 湍流模型采用耦和 Langtry-Menter 修正关系的 SST (shear stress transport) 湍流模型以及自动壁面函数进行近壁面处的数值模拟. Langtry-Menter 转捩模型是一种严格建立在局部变量基础上的基于经验关联式的转捩模型, 其是基于间歇因子 γ 和转捩起始动量厚度雷诺数 Re_{θ_t} 的两方程输运方程, 间歇因子与 SST 湍流模型耦合用以开启转捩点下游的湍动能产生项, 促发当地的转捩; 动量厚度雷诺数用来捕捉当地湍流强度的影响, 且能够将经验关联式与间歇因子输运方程中的转捩起始准则联系起来. 该转捩模型考虑了来流湍流度、压力梯度对边界层转捩的影响, 关于此转捩模型的详细描述及

验证可以参考文献[12-13].

计算区域的网格如图 1 所示,在叶片近壁面垂直于壁面方向布置了不少于 40 层 O 型网格,弦长方向布置不少于 250 个网格节点以便捕捉流动分离和转捩的位置,沿叶高方向布置了 5 层网格计算节点,总网格数为 13 万,为了捕捉边界层内部详细的流场细节保证近壁面第 1 层网格满足 $Y^+ < 1$. 加表面被动控制方式后,对控制体周围的网格进行了局部加密,其他区域的网格与光滑壁面时相同.



(b) 控制区的网格

图 1 计算区域网格

Fig. 1 Computational grids

计算进口边界条件给定气流速度、方向及自由来流湍流强度 T_u ; 出口给定平均静压; 叶片表面给定固壁边界; 上、下两端壁采用对称边界条件; 其余为周期性边界条件, 只求解一个叶栅通道.

2 数值计算结果确认

为了验证数值计算结果的准确性, 针对 IET-LPTF 叶型对自由来流湍流强度 $T_u = 1.5\%$, 用 3 种典型雷诺数 (基于进口速度和轴向弦长) 的静压力系数曲线及 6 种雷诺数下的总压损失系数与实验结果进行对比. 实验结果是在中国科学院工程热物理研究所低速叶栅实验台上获得的, 实验台的具体参数为: 自由来流湍流强度 $T_u = 1.5\%$, 自由来流马赫数 $Ma < 0.35$, 实验段入口宽度为 100 mm, 轴向密流比为 1.03. 雷志军等^[14] 对该实验

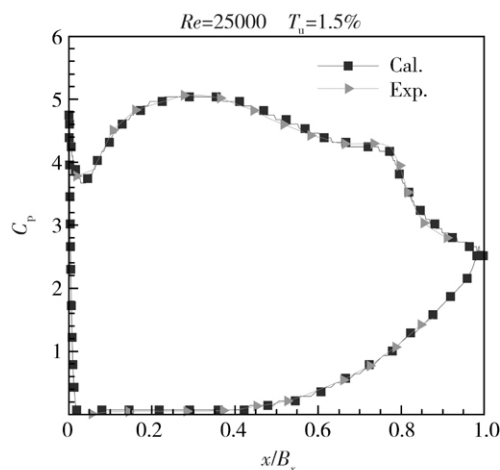
台的流场品质进行了验证, 表明该实验台具有很好的进口流场均匀性, 出口流场周期性, 和叶栅流动二维性, 满足低速叶栅实验台的要求.

图 2(a)~图 2(c) 分别给出了 $T_u = 1.5\%$, 25 000, 80 000, 150 000 三种雷诺数下 IET-LPTF 叶型表面静压力系数沿叶型无量纲轴向弦长的分布, 其中表面静压系数 C_p 的定义为

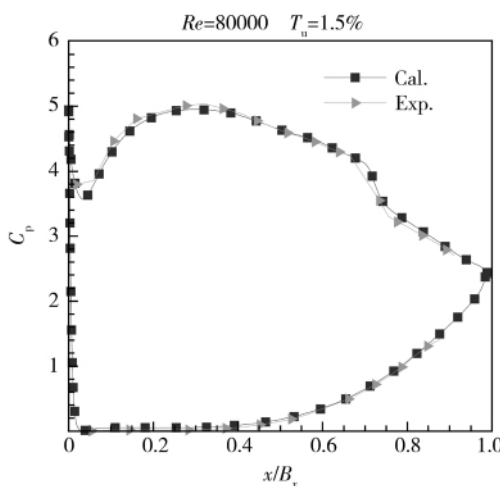
$$C_p = (p_{0,i} - p_{s,l}) / (p_{0,i} - p_{s,i}) \quad (2)$$

其中下标 i 表示进口, 0 表示总参数, s 表示静参数, l 表示叶型表面局部的参数, 图中 PS 表示压力面, SS 表示吸力面.

从图 2 中可以看出 3 种雷诺数下数值与实验结果符合的较好, 雷诺数为 25 000 时叶片吸力面 $60\% B_x$ 处出现了“静压凸肩”, 对应着比较大的分离泡, 从图中还可以看出数值模拟的分离泡比实验测量的略小; 当雷诺数为 80 000 时分离泡变得非常小, 数值模拟的结果也表明此时存在一个非常小的分离泡; 当雷诺数为 150 000 时叶片吸力面的分离泡完全消失.



(a) $Re=25000$ 时 C_p



(b) $Re=80000$ 时 C_p

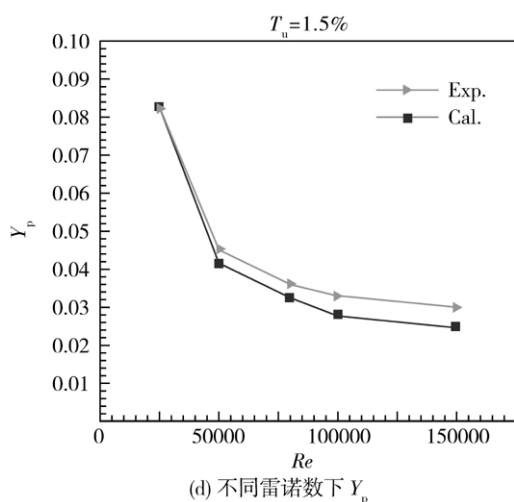
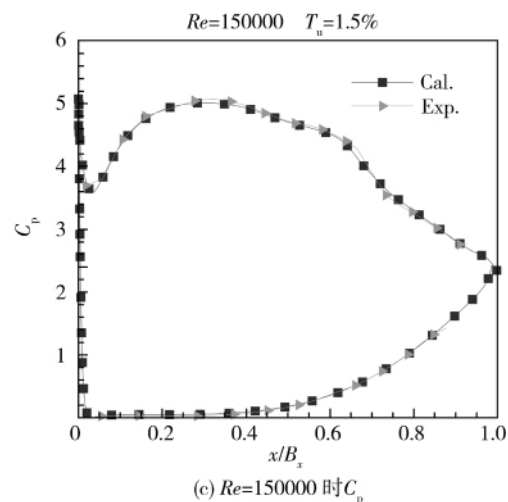


图 2 数值模拟与实验结果的对比

Fig. 2 Numerical simulation vs. experimental result

图 2(d) 是总压损失系数 Y_p 随雷诺数变化的数值计算与实验结果的对比. 总压损失系数 Y_p 的定义为

$$Y_p = (p_{0i} - p_{0o}) / (0.5 \cdot \rho \cdot \bar{U}_o^2) \quad (3)$$

其中 o 表示出口, 即进出口平均总压之差与出口平均动压之比.

从图 2 中可以看出在雷诺数为 25 000 下数值模拟的结果与实验结果符合的非常好, 而当雷诺数继续增大到 35 000~150 000 时数值计算结果相比实验结果损失偏小, 这可能是因为当雷诺数较大时叶型损失较小, 真实的实验环境中的一个扰动都可能对实验结果带来较大的影响, 但这并不影响我们进行定性分析.

3 计算结果与讨论

3.1 不加控制方式的计算结果

1) 雷诺数对叶型损失的影响

如图 2(d) 所示随着雷诺数的增大, 叶型损失逐渐降低, 这主要是因为当雷诺数很小时, 在叶片的吸力面出现了较大的分离泡, 随着雷诺数的增加分离泡逐渐消失, 几乎没有分离损失, 总压损失系数曲线逐渐趋于水平.

2) 自由来流湍流强度对叶型损失的影响

图 3 所示是不同雷诺数在不同自由来流湍流强度 (以下简称湍流强度) 下的总压损失系数随雷诺数的变化. 在雷诺数 25 000~80 000 的变化范围内, 总压损失系数呈先减小后增大的趋势, 并在 $T_u=4.0\%$ 时达到最小, 这主要因为在这些雷诺数来流范围内在 $T_u=4.0\%$ 时分离泡已经很小或消失, 湍流强度继续增加会带来湍流湿面积的增加, 引起损失增加; 当雷诺数为 100 000 时总压损失系数在 $T_u=1.5\%$ 时达到最低, 从图 2 可知当雷诺数高于 80 000 时叶片吸力面的分离泡基本消失, 所以当湍流强度继续增加时总压损失系数随之增大; 当雷诺数为 150 000 时随着湍流强度的增加总压损失系数逐渐增大, 此时在这 4 种湍流强度范围内叶片吸力面都没有出现分离泡, 增大湍流强度会增加湍流湿面积引起损失增加. 这将在 3.2 节进一步证明.

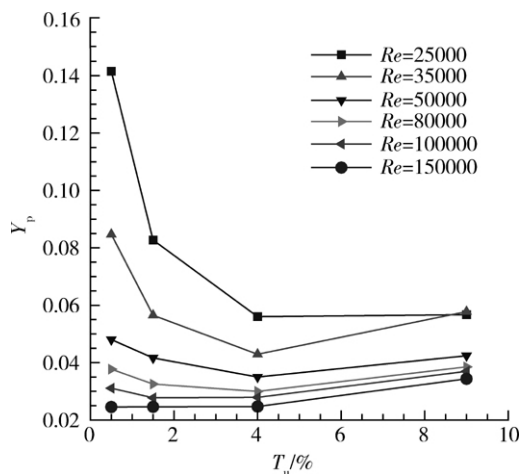


图 3 总压损失系数随自由来流湍流强度的变化

Fig. 3 Total pressure loss coefficient vs. free stream turbulence intensities

3) 攻角对叶型损失的影响

图 4 所示来流雷诺数为 25 000, $T_u=1.5\%$ 时总压损失系数随攻角的变化. 从图中可以看出攻角为 -10° 时叶型损失最低, 当攻角向两侧变化时, 叶型损失都变大, 而在正攻角范围内叶型损失会急剧的增加. 如图 5 所示, 当攻角向负攻角范围内增大时压力面的分离泡逐渐变大, 吸力面的分离泡逐渐

变小;当攻角向正攻角范围内($>+5^\circ$)变化时压力面的分离泡逐渐消失,吸力面的分离泡逐渐提前到叶片前缘位置而不再附。

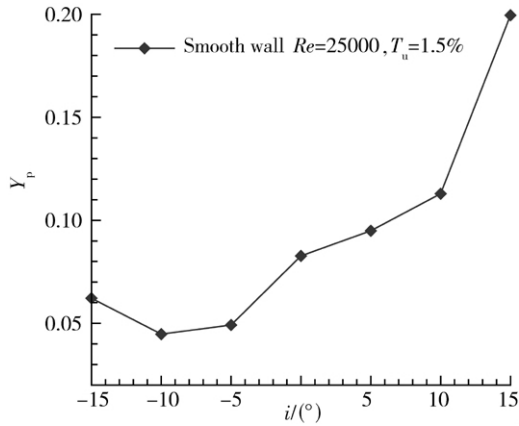


图 4 攻角对总压损失系数的影响

Fig. 4 Total pressure loss coefficient vs. attack angle

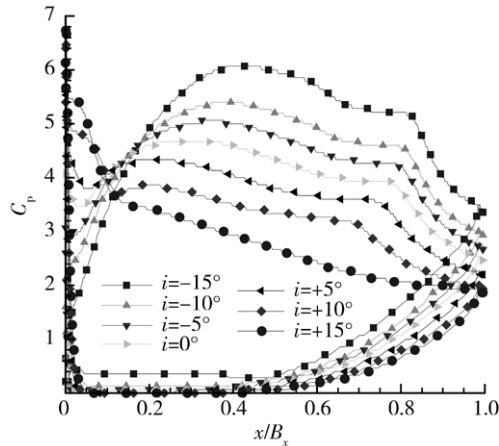


图 5 不同攻角下的静压力系数

Fig. 5 Surface static pressure coefficient at different attack angles

Denton^[15]给出的计算边界层单位面积熵的公式

$$S = C_d \rho V_\delta^3 / T \quad (4)$$

其中 C_d 为耗散系数, V_δ 为边界层边缘速度. 由 Denton 给出的计算公式可知, 单位面积熵与当地边界层边缘速度的立方成正比. 由于吸力面边界层的速度高于压力面, 吸力面较大的分离泡引起的叶型损失大, 所以在正攻角范围内叶型损失急剧增加, 而在负攻角范围内叶型损失先降低后增加。

3.2 加被动控制后的结果

表 2 为根据 ZHANG^[8-10], Robarge 等^[11] 的研究结论经优化后的被动控制方式的参数及加载位置. 这里不再详细地讨论被动控制方式的优化,

而主要着眼于控制前后对叶型损失的影响及对控制机制的分析。

表 2 控制方式参数

Table 2 Schematic parameters of flow control methods

名称	形状	高度/ mm	宽度直径/ mm	位置 (x/B_x)
Dimple	凹槽	-0.84	5.6	0.66
Wire	圆形拌线		0.84	0.49
Step	矩形拌线	0.84	3.53	0.49

如图 6 所示为 $Re=25000$, $T_u=1.5\%$ 时吸力面不加被动控制方式和加 3 种被动控制方式后的速度场云图及局部流线示意图. 从图中可以看出, 加 3 种被动控制方式后分离泡均变小了. 加拌线时分离和再附点的位置都提前很多, 而加凹槽时分离位置没有明显变化, 再附点的位置提前了. 关于 3 种被动控制方式如何减小分离泡, 降低损失的机制将在下面给出详细的解释。

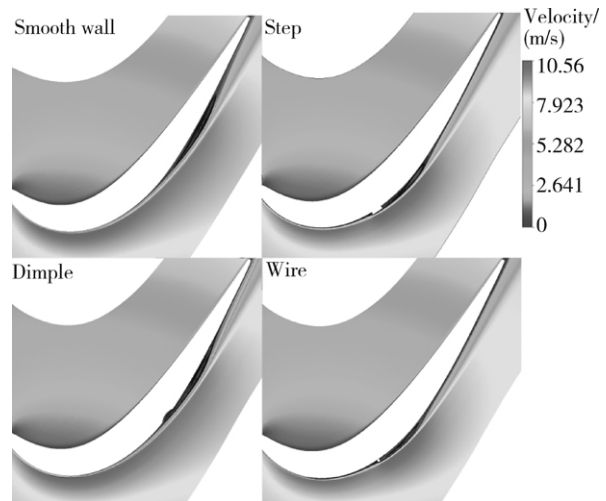


图 6 不同吸力面的速度流场及局部流线图

Fig. 6 Velocity cloud chart and part streamline of various suction surfaces

1) 雷诺数的影响

如图 7 所示为 $T_u=1.5\%$ 时 3 种被动控制方式及不加控制方式时总压损失系数随雷诺数的变化; 图 8 为相应雷诺数和自由来流湍流强度下的分离泡的长度 SBL(separation bubble length)和湍流湿面积 TWA(turbulent wetted area)的大小. 从图 7 中可以看出在低雷诺数范围(25 000, 35 000)内 3 种被动控制方式都能有效地降低叶型损失, 3 种被动控制方式效果区别不大; 如图 8 所示, 在这 2 种雷诺数下 3 种被动控制方式使得

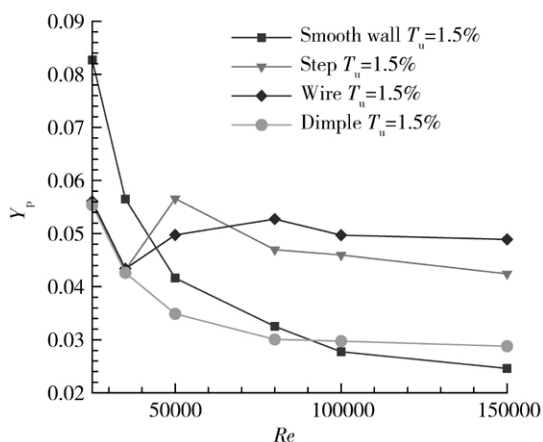
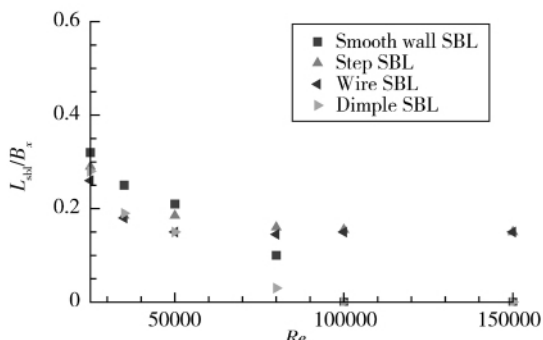
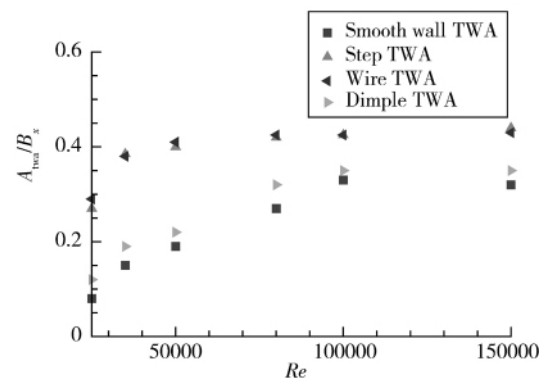


图 7 不同雷诺数下的总压损失系数

Fig. 7 Total pressure loss coefficient vs. Reynolds number



(a) 分离泡的长度



(b) 湍流湿面积

图 8 不同雷诺数下分离泡及湍流湿面积的大小

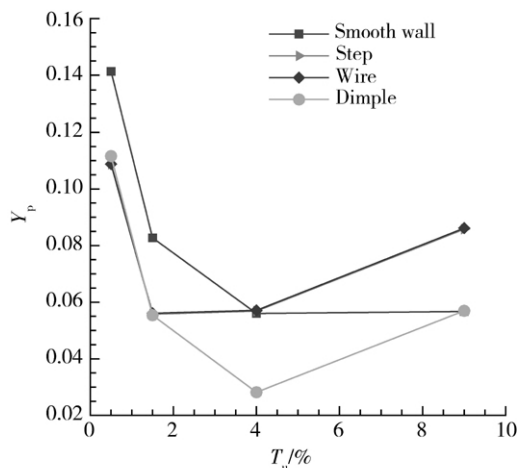
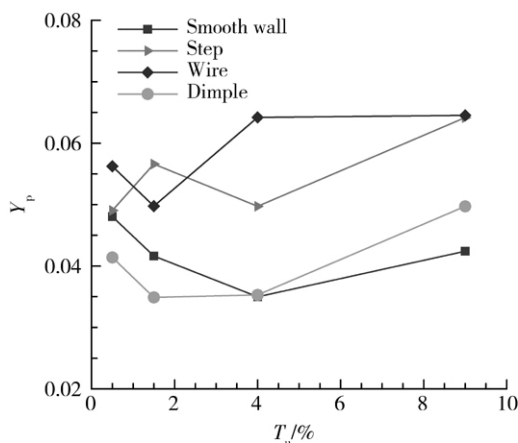
Fig. 8 Separation bubble length and turbulent wetted area with various Reynolds numbers

叶片吸力面的分离泡减小,但湍流湿面积增加了,分离泡的减小降低了叶型损失,但湍流湿面积的增加会增大叶型损失,叶型损失的降低是分离泡减小和湍流湿面积增加的综合的结果。当雷诺数增加到 50 000 时,加拌线尽管降低了分离泡的大小,但其增加的湍流湿面积过大所以叶型损失增

大;而加凹槽时由于其增加的湍流湿面积不大,且能有效的抑制分离泡直到雷诺数为 80 000 时其依然能有效的降低叶型损失。随着雷诺数的继续增加($>80\,000$ 时)加凹槽引起的湍流湿面积和加拌线时都比不加控制方式大,且加拌线在高雷诺数下依然会产生分离,所以此时 3 种被动控制方式都使叶型损失变大,但总体来说加凹槽时控制效果较好。从图 8 还可以看出分离泡随着雷诺数的增大逐渐变小,而湍流湿面积逐渐增大,最终趋于定值。

2) 湍流强度的影响

图 9 所示为 3 种雷诺数下总压损失系数随湍流强度的变化。由图 9(a)可以看出在低雷诺数下(25 000), $T_u < 4.0\%$ 时 3 种控制方式均能有效地降低叶型损失;随着湍流强度的提高($T_u = 4.0\%$),只有加凹槽的控制方式能有效地降低叶型损失,加拌线时叶型损失与不加控制方式时相当;当湍流强度进一步提高到 9.0% 时,3 种控制方式均不能有效地降低叶型损失,加凹槽时叶型

(a) $Re=25000$ 时总压损失系数(b) $Re=50000$ 时总压损失系数

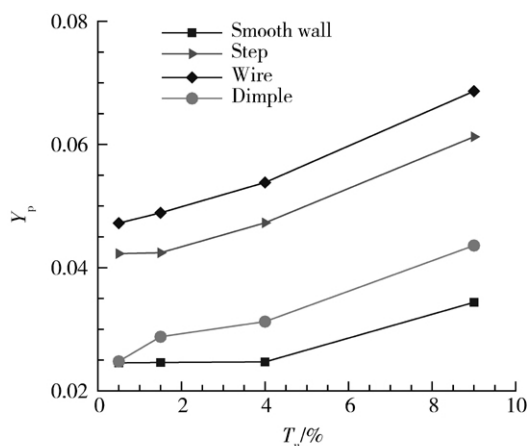
(c) $Re=150000$ 时总压损失系数

图 9 不同湍流强度下的总压损失系数

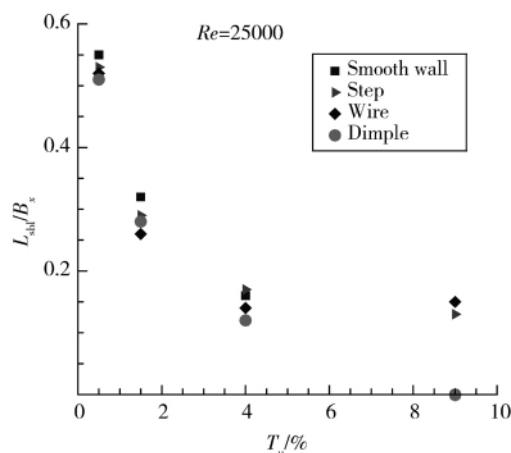
Fig. 9 Total pressure loss coefficient vs. free stream turbulence intensities

损失与不加控制方式时相当,加拌线会引起湍流湿面积的增加,引起叶型损失的增加.由图 9(b)可以看出随着雷诺数的提高到 50 000 时,表面加拌线在所给定的 4 个湍流强度范围内都不能有效的降低叶型损失,而加凹槽只有当 $T_u < 4.0\%$ 时可以有效的降低叶型损失.随着雷诺数的进一步提高到 100 000,如图 9(c)所示 3 种被动控制方式都不能有效的降低叶型损失.

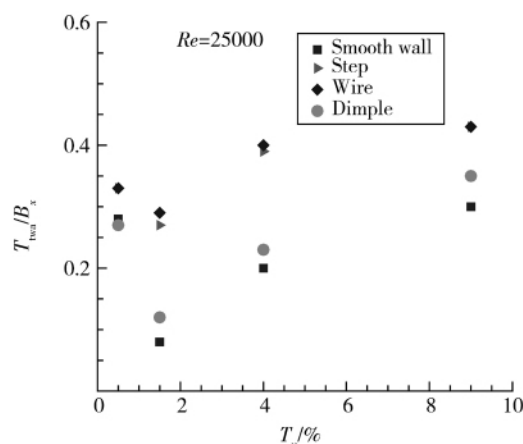
图 10 所示雷诺数为 25 000 时分离泡和湍流湿面积随湍流强度的变化,以此雷诺数下的分离泡和湍流湿面积的变化来说明湍流强度变化时控制方式减小损失的机理.如图所示分离泡随着湍流强度的增大逐渐变小,不加控制和加凹槽时在 $T_u = 9.0\%$ 时消失,而加拌线时分离泡的长度趋于定值.湍流湿面积随着湍流强度的增大先减小后增大,这就是为何湍流强度增大时图 3 和图 9(a)中的总压损失系数先减小后增大的原因,这说明存在一个最佳的湍流强度.表面加被动控制后,在 $T_u = 0.5\%$ 和 1.5% 时,3 种被动控制方式使分离泡都变小了;随着湍流强度提高到 4.0% 时,只有加凹槽时叶型损失降低了,这是分离泡的减小带来损失的降低和湍流湿面积带来损失的增加的综合结果;当湍流强度进一步增大到 9.0% 时,由于此时不加控制时已经没有分离泡,拌线会引起分离,3 种被动控制方式均会引起湍流湿面积的增加,所以损失都增加了.

3) 攻角的影响

如图 11 所示,在负攻角范围内,凹槽能有效地降低叶型损失;而在正攻角范围内拌线较能有



(a) 分离泡的长度



(b) 湍流湿面积

图 10 不同湍流强度下的分离泡长度及湍流湿面积

Fig. 10 Separation bubble length and turbulent wetted area with various free stream turbulence intensities

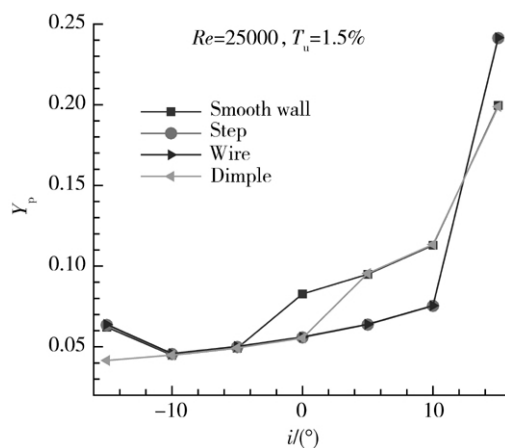


图 11 总压损失系数随攻角的变化

Fig. 11 Total pressure loss coefficient vs. attack angle

效地降低叶型损失,但当攻角继续增大到 $+15^\circ$ 时 3 种被动控制方式均不能有效地降低叶型损失.

图 12 所示为相应攻角下分离泡和湍流湿面积的大小. 图 12(a) 表明在负攻角下 3 种被动控制方式都使分离泡减小了, 在 $+5^\circ$ 攻角时凹槽使分离泡变大, 随着分离泡进一步增大到 $+10^\circ$, 3 种被动控制方式都使分离泡减小了, 但减小的不明显, 当攻角为 $+15^\circ$ 时 3 种被动控制方式下的分离泡和不加控制时相当. 图 12(b) 表明在负攻角范围内加拌线使得湍流湿面积大大增加, 尽管此时分离泡减小但叶型损失依然增加了; 而随着攻角的增大不加控制方式时湍流湿面积也在逐渐变大, 大小接近加控制方式时, 所以在 $0^\circ \sim +10^\circ$ 攻角范围内加拌线能有效地降低叶型损失. 加凹槽时湍流湿面积和不加控制方式时变化趋势一致且大小相当, 所以能否有效地降低叶型损失与其是否有效地抑制分离泡的大小有关.

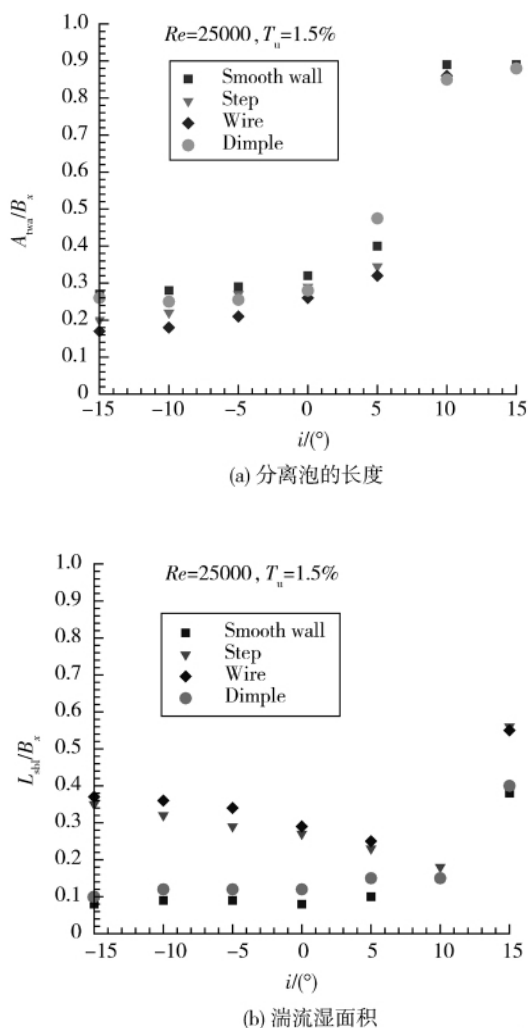


图 12 分离泡和湍流湿面积随攻角的变化

Fig. 12 Separation bubble length and turbulent wetted area with various attack angle

3.3 表面被动控制方式控制机制分析

图 13 所示为 $Re=25000$, $T_u=1.5\%$ 时 4 种叶型表面状况时的吸力面的壁面切应力, 表 3 为相应的分离点、转捩点、再附点的位置. 根据图 13 和表 3 可知: 2 种表面拌线均使分离点、转捩点、再附点的位置提前了, 转捩点相对于分离点的位置提前, 分离泡变小, 所以叶型损失降低; 而表面加凹槽时, 转捩的位置提前了, 再附点的位置也提前了, 分离泡变小. 表面加拌线促使分离提前, 加速转捩来减小分离泡, 表面加凹槽通过加速转捩来抑制分离泡, 从而降低叶型损失. 从图中还可以看出两种加拌线的方式在拌线的加载位置壁面剪切力出现尖峰信号, 但其后并没有立即发生转捩, 所以 3 种被动控制方式均加速了转捩的提前发生而不是立即促发转捩. 从图 13 中还可以看出 3 种被动控制方式均增加了湍流湿面积, 所以在选择

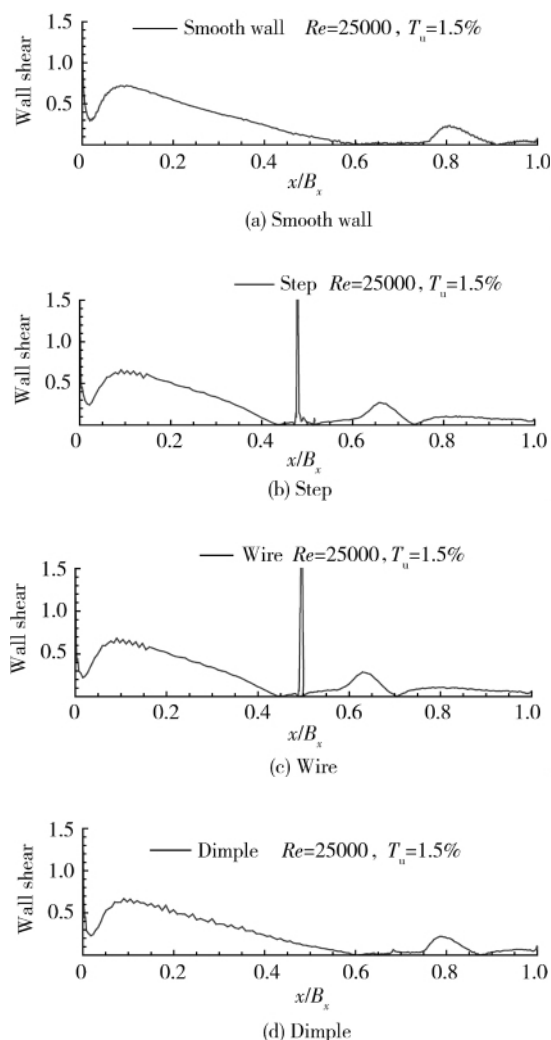


图 13 吸力面的壁面剪切应力

Fig. 13 Wall shear stress on suction surface

加载被动控制方式的位置时要尽量避免引起过大的湍流湿面积,使加载的位置尽量靠后。

表 3 不同控制位置的分离、转捩区变化

Table 3 Separation and transition region at different control locations

名称	分离起始点 (x/B_x)	转捩起始点 (x/B_x)	再附点 (x/B_x)
Smooth wall	0.60	0.76	0.92
Step	0.44	0.58	0.73
Wire	0.45	0.58	0.70
Dimple	0.60	0.74	0.87

4 结 论

在数值计算结果得到验证的基础上,通过改变来流雷诺数、湍流强度和攻角,对不加控制方式和加 3 种被动控制方式进行数值模拟,得到以下结论:

1) 随着雷诺数的增加,分离泡逐渐减小直至消失,湍流湿面积逐渐增加而趋于定值;在低雷诺数下 3 种控制方式都使分离泡变小,但增加了湍流湿面积,能否有效地降低叶型损失是两者综合的结果。

2) 随着湍流强度的增加,分离泡逐渐变小,湍流湿面积先减小后增大,存在最佳的湍流强度;在低湍流强度下 3 种控制方式都能使分离泡变小,降低叶型损失,但湍流湿面积增大了,随着湍流强度的提高,3 种被动控制方式都会引起损失增加。

3) 当攻角向负攻角变大时,叶型损失先降低后增大,而向正攻角变大时叶型损失迅速增大,这主要是因为正攻角范围内吸力面的分离泡会逐渐增大而趋于大分离;表面凹槽能降低负攻角时的叶型损失,而 2 种加拌线的方式有利于降低正攻角时的叶型损失。

4) 综合 3 种变工况时的情况,在雷诺数和湍流强度改变时,加凹槽的控制效果较好;而在改变攻角时,2 种表面加拌线的控制效果较好;在 $Re=25000$, $T_u=1.5\%$ 时 3 种被动控制方式均通过加速转捩的提前发生再附位置提前来抑制分离泡,但同时会引起湍流湿面积的增加,在加被动控制方式时尽量选择较靠后的位置。

致谢

感谢中国科学院超级计算中心为本文的顺利

完成提供计算资源及国家自然科学基金委为本文的完成提供资金支持!

参考文献:

- [1] Paloma G, Mikel L, Victor O. Low pressure turbine design for Rolls-Royce trent 900 turbofan[R]. ASME paper GT-2006-90997, 2006.
- [2] Curtis J D, Hodson H P, Baniaghbal M R, et al. Development of blade profiles for low-pressure turbine applications[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119(3): 531-538.
- [3] Bons J P, Sondergaard R, Rivir R B. Turbine separation control using pulsed vortex generator jets[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(2): 198-206.
- [4] Bons J P, Sondergaard R, Rivir R B. The fluid dynamics of LPT blade separation control using pulsed jets[R]. ASME paper GT-2001-0190, 2001.
- [5] Volino R J. Separation control on low-pressure turbine airfoils using synthetic vortex generator jets[R]. ASME Paper GT-2003-38729, 2003.
- [6] Lake J P, King P I, Rivir R B. Low Reynolds number loss reduction on turbine blades with dimples and V-grooves[R]. AIAA-2000-0738, 2000.
- [7] Volino R J. Passive flow control on low-pressure turbine airfoils[R]. ASME Paper GT-2003-38728, 2003.
- [8] ZHANG Xuefeng, Vera M, Hodson H P, et al. Separation and transition control on an aft-loaded ultra-high-lift LP turbine blade at low Reynolds numbers; low-speed investigation[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2007, 129(2): 340-347.
- [9] ZHANG Xuefeng, Hodson H P. The combined effects of surface trips and unsteady wakes on the boundary layer development of an ultra-high-lift LP turbine blade[R]. ASME Paper GT-2004-53081, 2004.
- [10] ZHANG Xuefeng. Separation and transition control on ultra-high-lift low pressure turbine blades in unsteady flow[D]. Cambridge: Cambridge University, 2005.
- [11] Robarge T W, Stark A M, Min S K, et al. Design considerations for using indented surface treatments to control boundary layer separation[R]. AIAA-2004-425, 2004.
- [12] Menter F R, Langtry R B. A correlation-based transition model using local variables: Part I model formulation[R]. ASME Paper GT-2004-53452, 2004.
- [13] Langtry R B, Menter F R. A correlation-based transition model using local variables: Part II test cases and industry applications[R]. ASME Paper GT-2004-53454, 2004.
- [14] 雷志军, 王明杰, 朱俊强. 低速压气机叶栅吸力面附面层分离的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(11): 1839-1843.
LEI Zhijun, WANG Mingjie, ZHU Jun qiang. Experimental investigation on the suction surface boundary layer separation of a low-speed compressor cascade[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(11): 1839-1843. (in Chinese)
- [15] Denton J D. Loss mechanisms in turbomachines[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1993, 115(4): 621-656.