

基于均匀设计法的涡轮叶栅水滴型前缘修型结构的数值优化研究^{*}

郭鑫¹, 吴艳辉^{1,2}, 张紫云¹, 周小兵¹, 范鑫¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;
2. 陕西省航空发动机内流动力学重点实验室, 陕西 西安 710129)

摘要: 为了最大程度地降低端区二次流对涡轮叶栅带来的流动损失, 对某典型低压涡轮叶栅引入水滴型前缘修型结构并进行设计参数优化。首先使用控制变量法研究单一设计参数变化对流动控制效果的影响; 然后基于均匀设计法, 对不同设计参数组合的水滴型前缘修型结构的流动控制效果进行数值模拟, 获取控制端区二次流最优的设计方案。结果表明: 控制变量优化下的最佳设计方案可以使总压损失降低6.1%; 均匀设计优化下的最佳设计方案可以使总压损失降低8.61%。与控制变量法相比, 均匀设计法得到的水滴型前缘修型优化结构能够更大程度地降低前缘马蹄涡强度, 延后通道涡到达吸力面的位置, 减小通道涡对主流的影响范围, 进而从流动机理层面证实了均匀设计法优化水滴型前缘修型的可行性。

关键词: 涡轮叶栅; 端区二次流; 水滴型前缘; 控制变量; 均匀设计

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 08-210137-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210137

Numerical Optimization of Teardrop Leading-Edge Fillet by Uniform Design Method in Turbine Cascade

GUO Xin¹, WU Yan-hui^{1, 2}, ZHANG Zi-yun¹, ZHOU Xiao-bing¹, FAN Xin¹

(1. College of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Shaanxi Aero Engine Internal Flow Mechanics Laboratory, Xi'an 710129, China)

Abstract: To control the endwall losses caused by the secondary flow in a typical low pressure turbine cascade, a teardrop leading-edge fillet was introduced into it and a series of numerical simulations were carried out to obtain its optimal design parameters. The control variable method was first used to study the influence of single design parameter variation on flow control effect. Then, the uniform design method was used to investigate the flow control effect among different design parameter variations by numerical simulation, and the optimal design for controlling secondary loss was obtained. The results show that the optimal fillet obtained by control variable method could reduce the total pressure loss by about 6.1%, while the optimal fillet obtained by uniform design method could mitigate the total pressure loss by about 8.61%. A detail of flow analysis show that the optimal fillet obtained by uniform design method could further lower horseshoe vortex intensity, delay development of the pas-

^{*} 收稿日期: 2021-03-10; 修订日期: 2021-06-01。

基金项目: 国家自然科学基金 (51790512; 52176045); 国家科技重大专项 (J2019-II-0019-0040)。

作者简介: 郭鑫, 硕士生, 研究领域为涡轮端区流动结构及控制方法。

通讯作者: 吴艳辉, 博士, 教授, 研究领域为叶轮机械复杂流动机理及流动控制。

引用格式: 郭鑫, 吴艳辉, 张紫云, 等. 基于均匀设计法的涡轮叶栅水滴型前缘修型结构的数值优化研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8):210137. (GUO Xin, WU Yan-hui, ZHANG Zi-yun, et al. Numerical Optimization of Teardrop Leading-Edge Fillet by Uniform Design Method in Turbine Cascade[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):210137.)

sage vortex and reduce its influence range in mainstream as compared to that obtained by control variable, thus proving the feasibility of using uniform design method to optimize teardrop leading-edge fillet from the aspect of flow mechanism.

Key words: Turbine cascade; Endwall secondary flow; Teardrop leading edge; Control variable; Uniform design

1 引言

燃气涡轮作为航空发动机的三大部件之一,将来自燃烧室的高温高压燃气所具有的能量转化为发动机轴上的旋转机械功,从而带动风扇、压气机以及其他附件工作,因而,涡轮部件对于航空发动机的研发而言具有极其重要的作用。而涡轮端区存在非常复杂的二次流涡系,产生的二次流损失对涡轮效率乃至整个发动机性能来说具有重要的影响。Denton^[1]研究发现,涡轮通道内总损失的1/3是端区损失;Sharma和Bulter^[2]认为端区损失占总损失的30%~50%。

二次流损失是端区损失的主要组成部分,它是由于端壁边界层分离产生的马蹄涡、横向压力梯度产生的通道涡以及它们之间的相互作用引发的。为此,从削弱/抑制旋涡的角度出发,国内外学者提出不同种类的控制端区二次流的方法。它们包括涡流发生器^[3-4]、非轴对称端壁设计^[5-7]以及前缘修型^[8-16]等。其中,前缘修型作为一种简单的、低成本的控制方法,得到了大量的研究,在涡轮端区流动控制中显示了广阔的应用前景。

Zess等^[8]最先在某涡轮导叶的叶根前缘位置施加一个带状结构,通过实验测量及数值模拟的手段发现,带状前缘加速了边界层流动,减小了叶展方向的压力梯度,成功地抑制了马蹄涡的产生。Sauer等^[9]将球状前缘修型结构应用到一高负荷低压涡轮叶片前缘,有效地减小了涡轮叶栅端区二次流损失。Becz等^[10]在某高负荷涡轮叶栅中,将带状结构和球状结构对流动损失的控制效果进行了对比,发现两种结构均能降低损失,但是损失减小量最大的区域不同。后来的Lethander等^[11]、Gregory-Smith等^[12]、Turgut等^[13]、Miyoshi等^[14]同样通过实验测量和数值模拟验证了前缘修型在控制二次流方面的可行性,但在造型方面未给出明确的定义。

孙大伟等^[15]以某型高压涡轮叶栅为研究对象,利用函数构造球状前缘以控制二次流损失,发现大尺寸的球状结构比小尺寸的球状结构控制效果更好。魏佐君等^[16]以某型高负荷涡轮叶栅为研究对

象,探索了基于水滴函数和余弦函数的带状前缘对于涡轮二次流损失的控制效果,结果表明水滴型带状前缘控制二次流的效果优于余弦前缘。

前缘修型在控制涡轮端区二次流方面已有较多的研究,虽然有学者研究利用控制变量试错性计算对水滴型前缘修型结构的设计参数进行一定优化,但是其优化过程依赖于修改单一设计参数后所研究叶栅损失表现出来的规律性,并没有考虑不同设计参数变化的交互作用对流动控制效果的影响。此外,水滴型前缘修型结构应用于不同的研究对象可能表现出不一致的流动控制规律,因此采用控制变量法的研究结果不具有普适性。

均匀设计法是只考虑试验点在试验范围内均匀散布的一种试验设计方法,最早是由方开泰教授和数学家王元在1978年共同提出的,具有全面性、均衡性的优点^[17]。为此,本文将均匀设计法引入到水滴型前缘修型结构的设计参数优化中。以T106A典型低压涡轮叶栅为研究对象,引入水滴型前缘修型结构。在MATLAB辅助下,首先使用控制变量法优化水滴型前缘修型结构的设计参数,缩小参数的变化范围。然后,在该范围内利用均匀设计法对水滴型前缘修型结构的设计参数进一步优化。最后,通过对比两种方法得到的水滴型前缘修型的优化结构对于流场的影响,以期从流动机理层面证实均匀设计法优化水滴型前缘修型结构的可行性。

2 方法

2.1 研究对象

本文的研究对象是T106A典型低压涡轮叶栅。表1列出了该涡轮叶栅的基本设计参数和气动参数,Stieger等^[18]和Eulitz^[19]利用该叶栅对尾迹诱导的边界层转捩分别进行了实验研究和数值模拟研究,他们的研究结果可以为本文的研究提供数据校核和对比。

为了使前缘修型结构很好地与叶型相融合,必须选取端点处一阶导数为0的函数曲线构造前缘修型结构。三角函数曲线可做一参考。图1给出了水滴型曲线和三角曲线的对比图,可以看出,两者在 $x=0$ 和 $x=1$ 处一阶导数皆为0,但是水滴型曲线在 $x=1$ 附

近一阶导数变化率更小,应用到叶型上时,前缘结构的曲率变化小。

Table 1 Main design parameters of T106A cascade	
Parameter	Value/mm
Blade height h	375
Chord c	198
Axial chord b	170
Pitch p	158

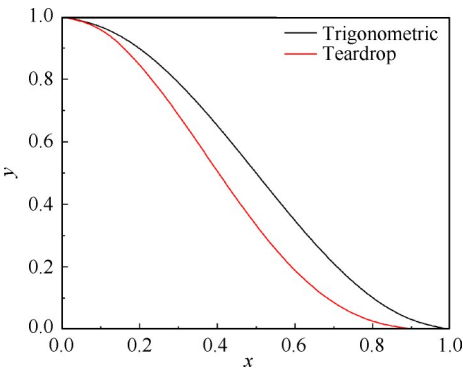


Fig. 1 Comparison of trigonometric curve and teardrop curve

图 2 给出了两种前缘修型轮廓线的对比图及主要设计参数,可以看出利用水滴型曲线进行前缘修型时,修型结构与叶型融合得更为光滑,对流动的不利影响更小,更加符合前缘修型的要求。其中水滴型函数如下

$$y = \frac{4}{3\sqrt{3}} \left[1 - \cos \left(-\frac{2\pi}{3}x + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \sin \left(-\frac{2\pi}{3}x + \frac{2\pi}{3} \right)$$

(1)

图中设计参数 H 代表水滴型前缘在叶展方向的高度, L_u 代表叶片前缘距离水滴型前缘在吸力面上起点的轴向距离, L_p 代表叶片前缘距离水滴型前缘在压力面上起点的轴向距离, L_s 代表水滴型前缘的最大厚度。

2.2 计算设置

本文的数值计算是采用 ANSYS-CFX 流体求解器来完成的。

计算工质选择理想气体,湍流模型采用 SST 模型,该模型结合了 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型的优点,在求解存在逆压梯度的边界层流动时表现出良好的精度^[20]。转捩模型则采用 Menter 等^[21]和 Langtry 等^[22]提出的 $\gamma-\theta$ 模型,其对转捩过程的判断是基于局部变量,因此对网格的适应性以及精度均较高。对流项

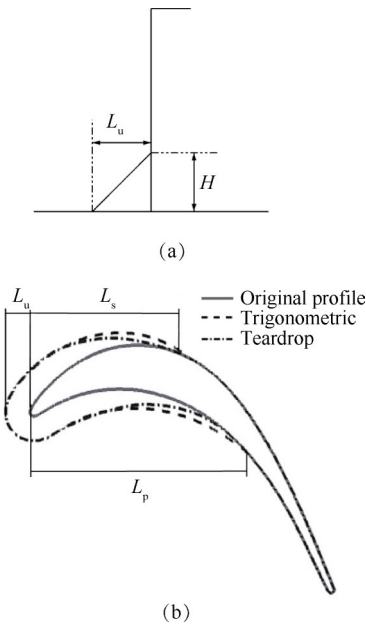


Fig. 2 Comparison of leading edge fillet profiles and main design parameters

离散采用高精度差分格式。计算时的边界条件为^[18]:进口总温为 313K,总压为 25920Pa,气流角为 37.7° ,湍流度为 5%,出口平均静压值为 23224.3Pa。由于流场的对称性,所以只计算半叶高的流场,上边界设置为对称面,其他固壁均采用绝热无滑移条件。

2.3 计算网格

图 3 给出了计算域网格的总体分布图以及细节放大图。在叶栅通道内采用 O4H 型网格拓扑,即叶片前缘和尾缘以及叶片两侧通道均采用 H 型网格,环绕叶片采用 O 型网格。所有网格在近壁面处采用加密处理,保证满足 y^+ 要求。带有水滴型前缘修型结构的叶栅和原始叶栅的网格节点数和加密方式一致。

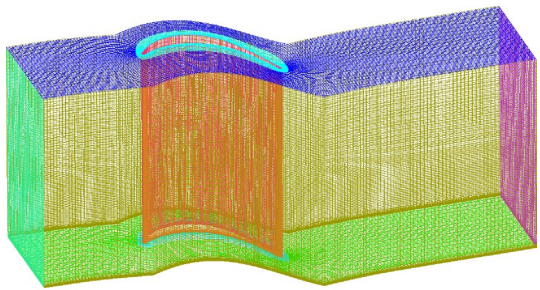
由于网格的疏密对计算结果会产生影响,所以本文对 68 万,126 万和 178 万三套网格进行计算,图 4 为不同网格数量下 25% 叶高截面处叶栅进口到出口周向平均后的静压和总压随轴向距离的变化情况,可以看出,静压和总压随轴向距离变化不大,说明该网格拓扑满足无关性要求。为了更准确地模拟通道内部涡系的变化细节,而又考虑计算资源的情况下,选取 126 万网格进行数值模拟。

2.4 数值计算验证

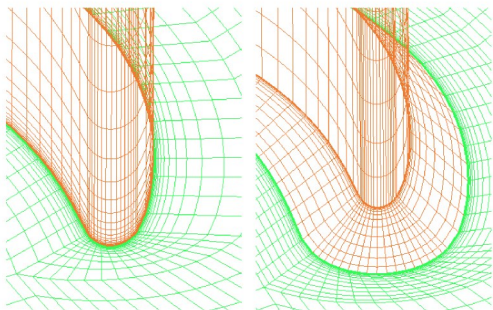
为了验证数值计算的可靠性,利用 Stieger 等^[18]的实验数据对计算结果进行校核,图 5 给出了 50% 叶高处的静压系数计算值和实验值对比图,其中静压系数定义为

$$C_p = \frac{p}{p_{t1}} \quad (2)$$

式中 p 表示叶片中径处静压, p_{t1} 表示叶栅进口截面处总压的面积平均值。可以看到, 计算结果和实验数据吻合良好。



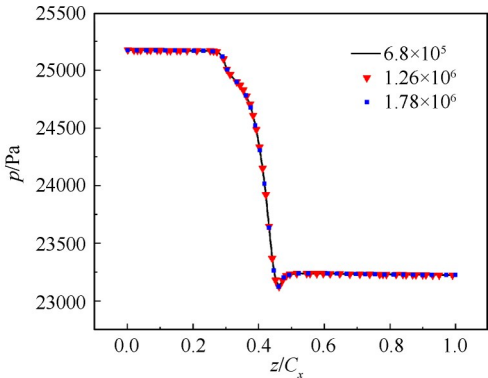
(a) Cascade mesh



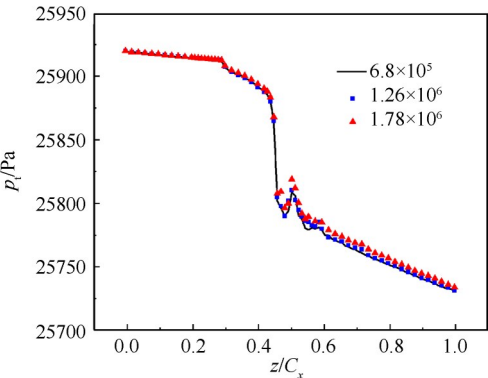
(b) Original profile

(c) Teardrop fillet

Fig. 3 Grid division and detail display



(a) Pressure



(b) Total pressure

Fig. 4 Grid independence verification

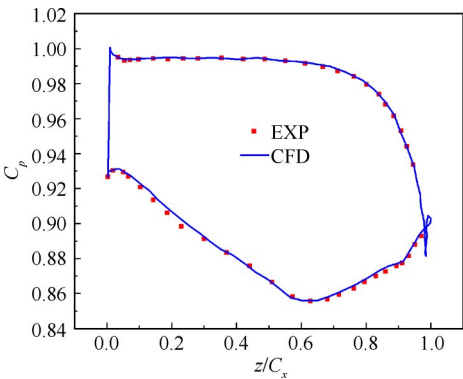


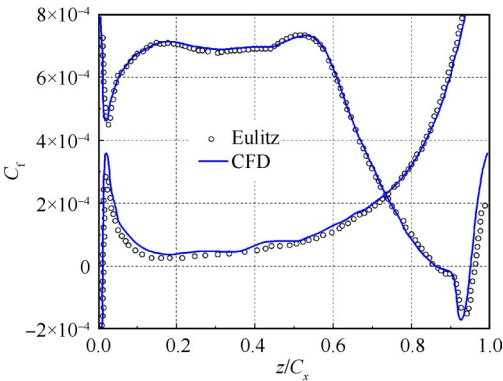
Fig. 5 Static pressure coefficient at 50% blade height

图 6 展示了近轮毂面处叶表的摩擦系数及叶片吸力面边界层形状因子的变化情况, 并且与 Eulitz^[19] 的计算数据进行对比。可以看到, 本文的计算结果和 Eulitz 的计算结果吻合良好。转捩起始点位置可根据壁面摩擦系数的急增来判断, 由图 6 可以看出, 在近轮毂叶片吸力面 $0.95C_x$ 处发生转捩^[19]。壁面摩擦系数和形状因子采用 Eulitz^[19] 论文中的定义

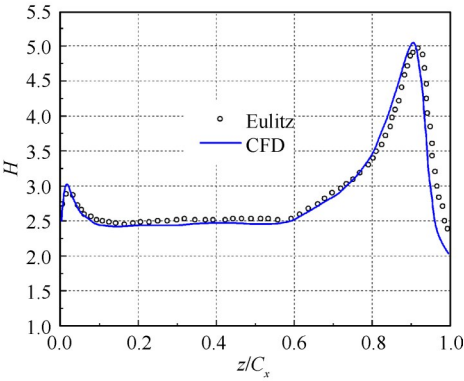
$$C_f = \frac{1}{\sqrt{Re}} \quad (3)$$

式中 Re 表示雷诺数。

$$H = \frac{\delta^*}{\delta^{**}} \quad (4)$$



(a) Friction coefficient



(b) Boundary layer shape factor

Fig. 6 Friction coefficient and boundary layer shape factor near the hub

式中 δ^* 是位移厚度, δ^{**} 是动量厚度。

3 结果与讨论

3.1 控制变量法缩小设计参数范围

为了得到均匀设计法的计算样本空间,本节先通过控制变量法缩小水滴型前缘修型结构设计参数的变化范围,利用总压损失相对减小量的大小评定控制效果。总压损失相对减小量 δ 的定义如下

$$\delta = \frac{\xi_0 - \xi_1}{\xi_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中 ξ_0 表示原始叶栅总压损失, ξ_1 表示带水滴型前缘修型结构叶栅的总压损失。其中,总压损失 ξ 的定义为

$$\xi = \frac{p_{t1} - p_{t2}}{p_{t2} - p_2} \quad (6)$$

式中 p_2 表示叶栅出口截面处静压的面积平均值, p_{t1} 和 p_{t2} 分别表示叶栅进口截面和出口截面处总压的面积平均值。

下面将分别以 L_s (叶片前缘距离水滴型结构在吸力面起点的轴向距离), L_p (叶片前缘距离水滴型结构在压力面起点的轴向距离), H (水滴型结构在叶展方

向的高度和) L_u (水滴型结构的最大厚度)的先后顺序进行研究。

首先,参考魏佐君等^[16]的研究结果,将 L_p , H 和 L_u 暂定为 $0.4C_x$,6mm和6mm,研究 L_s 的变化对流动控制效果的影响,其结果如图7(a)所示。可以看出,总压损失减小量在 $L_s=0.4C_x$ 之后都明显增大。当 $L_s=0.5C_x$ 时最大,故下一步研究中将 L_s 固定为 $0.5C_x$ 。

接着,将 L_s , H 和 L_u 的取值定为 $0.5C_x$,6mm和6mm,研究 L_p 的变化对流动控制效果的影响,其结果如图7(b)所示。可以看出,在 $L_p=0.4C_x$ 之后,总压损失的减小量得到明显提高。当 $L_p=0.7C_x$ 时最大,故下一步研究将 L_p 的取值由原来的 $0.4C_x$ 替换为 $0.7C_x$ 。

然后,将 L_s , L_p 和 L_u 的取值定为 $0.5C_x$, $0.7C_x$ 和6mm,研究 H 的变化对流动控制效果的影响,其结果如图7(c)所示。可以看出,当 $H=6$ mm时总压损失的减小量最大,故下一步研究中保持 H 的取值不变。

最后,将 L_s , L_p 和 H 的取值定为 $0.5C_x$, $0.7C_x$ 和6mm,研究 L_u 的变化对流动控制效果的影响,其结果如图7(d)所示。可以看出,在 $L_u=5$ mm之后,总压损失的减小量都明显增大,当 $L_u=6$ mm时最大。

经过以上控制变量法的筛选,可以发现,水滴型

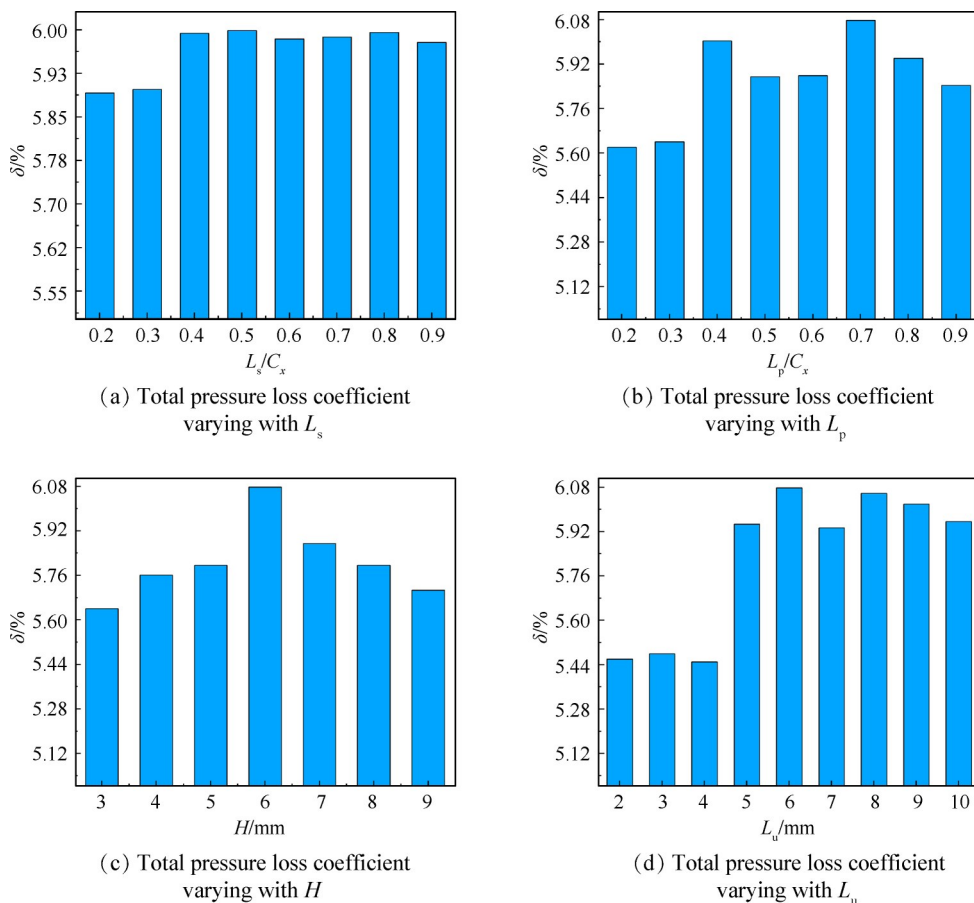


Fig. 7 Total pressure loss coefficient variations

前缘设计参数的变化会引起总压损失系数较大的变化,适当的参数设计会使得总压损失系数得到有效的降低。所得总压损失最小对应的水滴型前缘修型结构设计参数为 $L_s=0.5C_x$, $L_p=0.7C_x$, $H=6\text{mm}$ 和 $L_u=6\text{mm}$,此时流动控制效果最好,比原始叶栅的总压损失降低了 6.1%。

3.2 均匀设计法选择最优设计参数

以控制变量法来进行水滴型前缘修型结构设计参数优化时,仅研究了单一设计参数改变对流动控制效果的影响,没有考虑不同设计参数变化的交互作用给控制效果带来的影响,对计算样本的筛选不平衡不全面。但如果按照排列组合方式一一计算,四个设计变量,每个变量有五种以上情况,则至少需要计算 5⁴种结果,工作量过于巨大。因此本节将采用均匀设计法对水滴型前缘修型结构的设计参数进行全面、均衡的优化。

由 3.1 节的图 7(c)可以看出,当 $H=6\text{mm}$ 时,总压损失的减小量明显大于 H 的其他范围样本,所以本节将 H 固定为 6mm。因此在下面的研究中只需考虑 L_s , L_p 和 L_u 这三个设计参数的变化。水滴型前缘修型结构的设计参数优化问题是为了寻找一组设计参数,使得总压损失减小量最大,即控制该涡轮叶栅端区二次流效果最好。

为了对问题研究得更为细致,试验次数取因素数的 4 倍,即一共进行 12 次试验。根据 3.1 节的图 7,选取单一变量变化时总压损失系数减小量相对较大的范围,而又考虑简化均匀样本的设置过程,可以将 L_s , L_p 和 L_u 的变化范围缩小为 $0.35C_x \leq L_s \leq 0.9C_x$, $0.35C_x \leq L_p \leq 0.9C_x$ 和 $4.5\text{mm} \leq L_u \leq 10\text{mm}$,在该范围内分别设置 12 个均匀样本。

根据均匀设计法的相关理论^[23],当因素数为 3 时,选取均匀设计表 $U_{12}^*(12^{10})$ 中的 1, 6, 9 列数据进行试验,能够较为全面地考虑各个因素变化时的交互作用对试验结果的影响。为此,利用均匀设计表 $U_{12}^*(12^{10})$ 中 1, 6, 9 列对应的 L_s , L_p , L_u 的取值设计了表 2 所示的 12 种计算样本,并对其流动控制效果进行计算。

表 2 给出了 12 组均匀设计结果,结合 3.1 节控制变量优化结果可以看出,总压损失的减小量不会与某一设计参数的单一变化呈现很强的规律性,在各个参数组合中波动较大。水滴型前缘设计参数的变化具有交互效应,故使用简单的控制变量试错性方法不能得到理想的优化结果。均匀设计的出发点是均匀分散,它可保证试验点具有均匀分布的统计特性,可使每个因素的每个水平做一次且仅做一次试

验,这样会弱化参数变化之间的交互作用,着重在试验范围内试验点均匀散布以求通过最少的试验次数获得最多的信息^[24],也更加说明均匀设计优化水滴型前缘的必要性。

由表 2 可以看出,当计算样本编号为 10 时,即 $L_s=0.8C_x$, $L_p=0.7C_x$, $L_u=8.5\text{mm}$ 和 $H=6\text{mm}$ 时,水滴型前缘修型结构控制二次流效果最好,比原始叶栅的总压损失降低了 8.61%。

Table 2 Results of uniform design calculation for parameters of teardrop leading edge

Samples	L_s/C_x	L_p/C_x	L_u/mm	$\delta/\%$
1	0.35	0.60	9.0	4.17
2	0.40	0.90	7.5	4.32
3	0.45	0.55	6.0	3.74
4	0.50	0.85	4.5	3.70
5	0.55	0.50	9.5	5.34
6	0.60	0.80	8.0	3.85
7	0.65	0.45	6.5	5.14
8	0.70	0.75	5.0	6.43
9	0.75	0.40	10.0	7.95
10	0.80	0.70	8.5	8.61
11	0.85	0.35	7.0	7.33
12	0.90	0.65	5.5	6.35

3.3 前缘修型对出口流场的影响

为了便于分析流场中的流动情况,将未引入水滴型前缘修型结构的原始叶栅命名为 Base,将控制变量法优化后的最优前缘修型结构命名为 Case 1,将均匀设计法优化后的最优前缘修型结构命名为 Case 2。

图 8 给出了叶栅出口气流角展向分布曲线图。可以看到,Base 中出口气流在 0.05 倍叶高处过度转折,在 0.18 倍叶高处欠转折,这符合叶栅出口气流角分布的经典理论。水滴型前缘的引入使得气流在该处的欠转折和过度转折得到改善,气流角更加接近叶栅的设计值。其中,Case 2 对气流角的改善程度比 Case 1 明显,且气流角峰值更加靠近端壁区域。此外,水滴型前缘对叶中出口气流角的影响不大。

图 9 给出了距离叶片前缘 110% C_x 截面处总压损失云图和轴向涡量等值线图。其中,红线上的数值正号代表旋涡沿轴向顺时针旋转,负号代表旋涡沿轴向逆时针旋转,数值大小代表涡量大小,单位为 s^{-1} 。可以看到,此时有两个旋向相反的涡系结构。靠近端壁的是正涡量的通道涡,通道涡上方的是负涡量的脱落涡,高损失区域是由于这两个旋向相反的

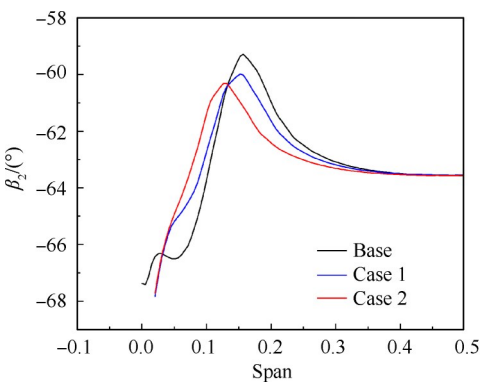


Fig. 8 Spanwise distribution of flow angle at cascade outlet

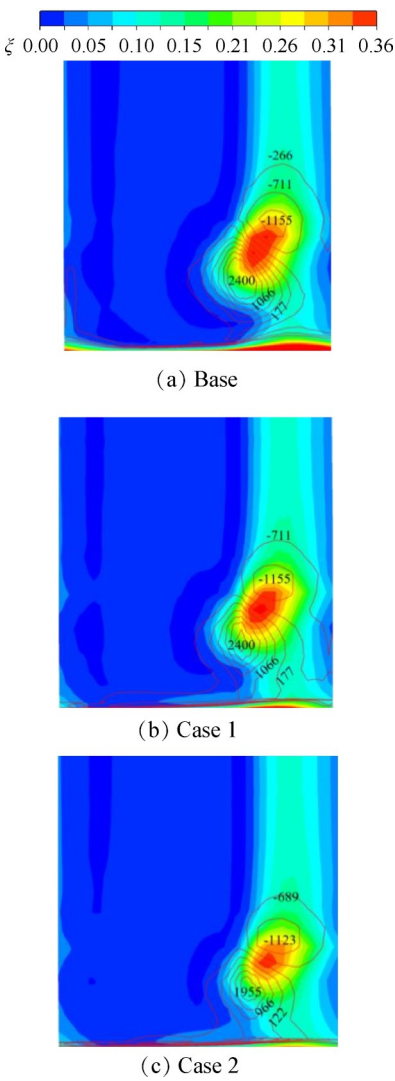


Fig. 9 Total pressure loss coefficient and contour of axial vorticity(s^{-1}) at 110% C_x from the blade leading edge

涡系结构相互作用而产生的摩擦造成的。带状前缘的引入会使得该截面处通道涡和脱落涡的强度减弱,相互作用的尺度减小,此时总压损失有所减小。Case 2 中总压损失明显低于 Base 和 Case 1,且主损失区域更靠近端壁处,减小了对叶中流场的影响。这

是因为前面提到的,Case 2 使得通道涡与吸力面作用的位置延后,被吸力面和主流压向叶中的范围没有前两个大,所以主损失区靠近端壁。

3.4 前缘修型流动机理分析

图 10 给出了叶片前缘沿展向的表面静压系数分布曲线,其中表面静压系数用进口总压进行无量纲化。可以看到,在原始叶栅 Base 的前缘部分 0.025 倍叶高内的区域中,叶片前缘静压呈现方向一致的压强梯度,该压强梯度的作用有助于边界层内低能流体向端壁卷起产生马蹄涡;水滴型前缘的引入使得近端壁区域与主流的静压差明显地减小,且出现了一个局部反向的静压梯度,这就明显地削弱了前缘马蹄涡形成的条件,从而减弱了前缘马蹄涡的强度。Case 2 控制效果更为明显。

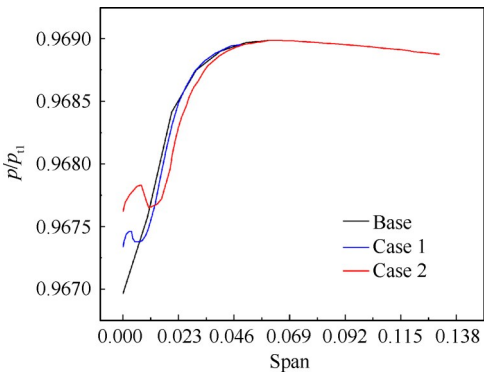


Fig. 10 Static pressure distribution along the spanwise of the blade leading edge

图 11 中给出了叶片前缘马蹄涡形成的截面极限流线图,从中可以观察到水滴型前缘对于前缘马蹄涡的影响。可以看到,水滴型前缘的引入使得部分端壁边界层流体到达叶片前缘时获得一个流向主流区的分速度,从而使得马蹄涡的边界层低能流体减少,水滴型前缘处的马蹄涡尺度也明显地减小。其中均匀设计法优化得到的 Case 2 对马蹄涡强度的减小量更为明显。

图 12 给出了垂直于 z 轴的 5 个不同截面的轴向涡量 ω_z 云图,以及用 λ_2 等值面显示的端区附近的旋涡结构。其中, λ_2 值取为 $-2.81 \times 10^6 s^{-2}$,等值面用轴向涡量进行渲染。由图 12(a)可以看出,马蹄涡压力面分支在发展的过程中逐渐和通道涡融合,成为通道涡的一部分,使得通道涡强度有所增加。由于横向压力梯度的作用,通道涡逐渐由压力面前缘向吸力面尾缘发展,最后作用于吸力面尾缘。在横向发展的过程中,通道涡会与马蹄涡吸力面分支这一反向涡系相互作用,使得马蹄涡吸力面分支消失,通道涡

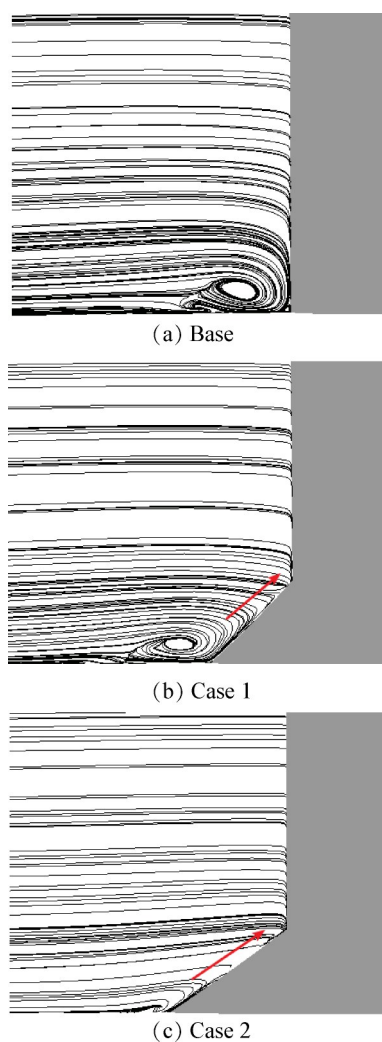


Fig. 11 Limit flow diagram of the blade leading edge

强度有所减弱。

通道涡自 $0.05C_x$ 截面处开始横向运动,水滴型前缘修型结构的引入使得这一涡系强度减弱,Case 2 减弱得最为明显。在 $0.2C_x$ 截面处,通道涡发展到叶栅通道中部,此时马蹄涡吸力面分支消失,通道涡强度有所减小。涡系到达 $0.45C_x$ 截面时,Base 中的通道涡已经与吸力面接触,Case 1 中的通道涡也快要到达吸力面,而 Case 2 中的通道涡还没有影响到吸力面。在 $0.65C_x$ 截面处,Base 和 Case 1 中的通道涡已经与吸力面充分接触,且被主流和吸力面压向叶中,而 Case 2 中通道涡此时刚刚接触到吸力面。涡系发展到 $0.8C_x$ 截面时,虽然 Case 2 中通道涡也被压向叶中,但是影响范围远远小于 Base 和 Case 1 中相应截面处通道涡的影响范围。此外,在 Base 中可以明显地看到通道涡横向移动的时候,诱导产生了压力面角涡 V_{pe} ,该涡与通道涡旋转方向相反,一直影响到叶栅出口,带状前缘的引入使得压力面角涡消失。

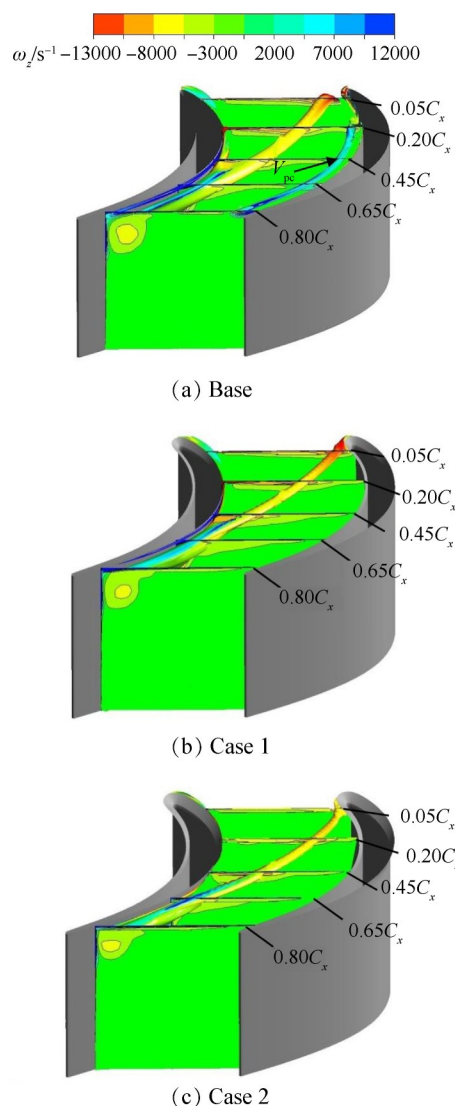


Fig. 12 Axial vorticity contour and vortex structures in the λ_2 criteria of different sections

综上所述,和控制变量法相比,通过均匀设计法优化得到的水滴型前缘修型结构,能够更为有效地减弱前缘马蹄涡强度,因而降低通道涡强度,在降低叶栅总压损失和改善出口气动性能方面表现更佳。

4 结 论

通过本文的分析研究,主要得到以下结论:

(1)水滴型曲线在 x 轴交点处一阶导数变化率更小,应用到叶片前缘修型时与叶型融合得更为光滑,对流场的扰动较小,更加符合前缘修型的要求。

(2)水滴型前缘的向前延伸长度(L_u),吸力面延伸位置(L_s),压力面延伸位置(L_p)以及高度(H)对于叶栅的总压损失系数有较大影响,且从均匀设计结果来看,设计参数变化具有交互作用。均匀设计优化的最佳设计参数造型方案可以使 T106A 叶栅

总压损失系数减小8.61%,比控制变量优化结果更好。

(3)水滴型前缘减弱了叶片前缘端区附近的展向压强梯度,并使其产生局部反向的静压梯度,从而抑制来流边界层低能流体的卷起,削弱了前缘马蹄涡的强度,并延后通道涡到达吸力面的位置,使得通道涡对主流的影响范围更小,从而减小了叶栅出口的总压损失。均匀设计法优化结果更佳,在流动机理层面验证了均匀设计法对水滴型前缘修型结构进行设计参数优化的可行性。

致谢:感谢国家自然科学基金、国家科技重大专项的资助。

参考文献

- [1] Denton J D. Loss Mechanisms in Turbomachines [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1993, 115(4).
- [2] Sharma O P, Butler T L. Predictions of Endwall Losses and Secondary Flows in Axial Flow Turbine Cascades [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1987, 109(2).
- [3] Lei Q, Zou Z, Peng W, et al. Control of Secondary Flow Loss in Turbine Cascade by Streamwise Vortex [J]. *Computers & Fluids*, 2012, 54: 45–55.
- [4] 蔡 蕾. 涡轮端区非定常相互作用机理及流动控制技术探讨[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009.
- [5] Panchal K, Abraham S, Ekkad S V, et al. Investigation of Effect of Endwall Contouring Methods on a Transonic Turbine Blade Passage [R]. *ASME GT* 2011–45192.
- [6] 那振喆, 刘 波, 赵刚剑, 等. 基于Bezier曲线的端壁造型设计方法研究[J]. *推进技术*, 2014, 35(5): 624–631. (NA Zhen-zhe, LIU Bo, ZHAO Gang-jian, et al. Design Method of Endwall Profiling Based on Bazier Curve [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(5): 624–631.)
- [7] 田兴江, 常海萍, 张镜洋, 等. 基于参数化脊线的非轴对称端壁成型方法[J]. *推进技术*, 2017, 38(6): 1294–1301. (TIAN Xing-jiang, CHANG Hai-ping, ZHANG Jing-yang, et al. Non-Axisymmetric Endwall Contouring Method Based on Parametric Ridge Line [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 1294–1301.)
- [8] Zess G A, Thole K A. Computational Design and Experimental Evaluation Fusing a Leading Edge Fillet on a Gas Turbine Vane [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2002, 124(2): 167–175.
- [9] Sauer H, Muller R, Vogeler K. Reduction of Secondary Flow Losses in Turbine Cascades by Leading Edge Modifications at the Enawall [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2001, 123(2): 207–213.
- [10] Becz S, Majewski M S, Langston L S. Leading Edge Modification Effects on Turbine Cascade Endwall Loss [R]. *ASME GT* 2003–38898.
- [11] Lethander A T, Thole K A, Zess G, et al. Optimizing the Vane-Endwall Junction to Reduce Adiabatic Wall Temperatures in a Turbine Vane Passage [R]. *ASME GT* 2003–38940.
- [12] Gregory-Smith D, Bagshaw D, Ingram G, et al. Using Profiled Endwalls, Blade Lean and Leading Edge Extensions to Minimize Secondary Flow [R]. *ASME GT* 2008–50811.
- [13] Turgut H, Camcl C. Experimental Investigation and Computational Evaluation of Contoured Endwall and Leading Edge Fillet Configurations in a Turbine NGV [R]. *ASME GT* 2012–69304.
- [14] Miyoshi I, Higuchi S I, Kishibe T. Improving the Performance of a High Pressure Gas Turbine Stage Using a Profiled Endwall [R]. *ASME GT* 2013–95148.
- [15] 孙大伟, 乔渭阳, 孙 爽, 等. 叶片前缘修型对涡轮叶栅二次流的影响[J]. *推进技术*, 2009, 30(2): 187–191. (SUN Da-wei, QIAO Wei-yang, SUN Shuang, et al. Effects of Leading-Edge Modification on Secondary Flow in Turbine Cascade [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(2): 187–191.)
- [16] 魏佐君, 乔渭阳, 赵 磊, 等. 基于水滴型带状前缘的涡轮端区损失控制数值研究[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(2): 473–482.
- [17] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [18] Stieger, Douglas R. The Effect of Wakes on Separating Boundary Layers in Low Pressure Turbines [D]. *Cambridge: Cambridge University*, 2002.
- [19] Eulitz F. A RANS Method for the Time-Accurate Simulation of Wake Induced Boundary-Layer Transition in Turbine Flows [C]. *Florence: Proceedings of 14th ISABE Conference*, 1999.
- [20] Menter F R, Kuntz M, Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model [J]. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2003, 4(1): 625–632.
- [21] Menter F R, Langtry R B, Likki S R, et al. A Correlation Based Transition Model Using Local Variables—Part I: Model Formulation [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2006, 128(3): 413–422.
- [22] Langtry R B, Menter F R. Transition Modeling for General CFD Applications in Aeronautic [R]. *AIAA* 2005–522.
- [23] 郭东星, 仇丽霞, 张满栋. 均匀设计方法及其应用[J]. *数理医药学杂志*, 2005, 18(1): 69–71.
- [24] 智翠梅. 均匀设计及优化[J]. *化工中间体*, 2007(3): 7–10.

(编辑:梅 瑛)