

变攻角下被动射流旋涡对高速扩压叶栅性能的影响

王若玉, 宋彦萍, 陈 浮, 秦 勇

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 对被动射流旋涡(PJV)控制高速扩压叶栅内的流动分离控制展开数值研究,并探究其在变工况条件下的适应特性。结果表明,PJV在设计攻角下可使叶栅总压损失系数降低5.2%,变攻角条件下的损失降低幅度最高可达7.8%,表明其具有较高的控制效率和良好的变工况适应特性。随着攻角的增大,吸力面分离位置提前,射流出口与分离区间的距离减小,PJV能够更为有效地促进附面层内低能流体与主流间的动量交换,使得壁面涡结构得到重新组织,并进一步影响通道涡、集中脱落涡等涡系结构的发展,从而推迟流动分离、减小损失。在综合考虑变攻角流场特性的前提下,应使PJV的作用位置位于分离区上游不远处,所研究的最佳射流位置位于叶片前缘上游40%轴向弦长处。

关 键 词: 攻角; 被动射流旋涡(PJV); 高速扩压叶栅; 气动性能; 流动控制

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effect of passive jet vortex on high-speed compressor cascade under different angles of attack

WANG Ruoyu, SONG Yanping, CHEN Fu, QIN Yong

(School of Energy Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The application of passive jet vortex (PJV) on a high-speed compressor cascade for flow separation control was studied numerically. The effectiveness of the technique at off-design conditions was investigated. Results indicated that the PJV could reduce the total pressure loss coefficient by 5.2% at the designed angle of attack, and by 7.8% under different angles of attack, validating its high control efficiency and good adaptability. With the increase of the angle of attack, the flow separation on the blade suction surface would take place earlier and the distance between the jet exit and the separation region would decrease, which could strengthen the effect of PJV in enhancing momentum exchange and reorganizing the vortex structures like the passage vortex and the concentrated shed vortex within the passage, thus delaying the flow separation and reducing flow losses. Taking different angles of attack into consideration, it is suggested that the PJV be located near the upstream separation region. The optimum location of the jet is at 40% axial chord length from the blade leading edge.

收稿日期: 2016-08-29

作者简介: 王若玉(1993—),女,硕士生,主要从事压气机复杂流动机理及流动控制研究。

通讯作者: 宋彦萍(1970—),女,教授、博士生导师,博士,主要从事叶轮机械气动热力学研究。E-mail: songyanping@hit.edu.cn

引用格式: 王若玉,宋彦萍,陈浮,等. 变攻角下被动射流旋涡对高速扩压叶栅性能的影响[J]. 航空动力学报,2018,33(3):729-740.
WANG Ruoyu, SONG Yanping, CHEN Fu, et al. Effect of passive jet vortex on high-speed compressor cascade under different angles of attack[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 729-740.

Key words: angle of attack; passive jet vortex (PJV); high-speed compressor cascade; aerodynamic performance; flow control

作为航空燃气涡轮发动机的主要气动部件——风扇/压气机,其效率和负荷水平必然随着航空发动机性能的提高而不断提高。然而,压气机叶片负荷持续增大的同时,叶栅流道内的横向压力梯度以及二次流动也随之增强,从而加剧了叶片吸力面及角区内的大尺度、非定常流动分离,并造成压气机效率和稳定工作范围的下降,制约压气机气动性能的进一步提升。

二次流损失是压气机内气动损失的主要来源,可占总损失的30%~50%^[1]。采用适当的流动控制技术合理组织流场结构,是减小二次流损失的重要措施之一。目前,压气机内流领域比较有代表性的一种流动控制技术是直接动量注入法,通过提高附面层或低能流体区的动量,从而增强其抵抗流向逆压力梯度的能力,推迟流动分离并减小流动损失。Culley等^[2]通过在压气机叶片吸力面直接注入高能流体,用仅占叶栅进口总流量1%的射流流量使总压损失减少了10%。Wiederhold等^[3]采用脉冲射流提高了某临界负荷压气机叶栅的扩压能力,有效降低了二次流损失,并通过对不同射流角度下流体再附特性的讨论进一步解释了脉冲射流的作用机理^[4]。Zander等^[5]通过在吸力面和端壁同时施加合成射流,增大了附面层内流体的湍动能,从而有效推迟了流动分离。基于徐大懋^[6]提出的反流缝隙叶片法,宋彦萍、陈浮等^[7-8]利用叶栅尾缘附近的缝隙射流减弱了某低速平面扩压叶栅内的流动分离,使总能量损失降低了4.75%。周敏等^[9-10]研究了动叶表面的槽道射流对压气机稳定工作范围的影响,当射流位于79%弦长处时其扩稳效果最佳。吴培根等^[11-12]将收敛的槽道结构引入某大折转角扩压叶栅,利用压力面与吸力面间的压差产生射流,使叶栅尾迹宽度减小了16.7%,有效降低了流动损失。该研究还发现最佳开槽位置位于叶型中部区域,但槽道附近的应力集中问题限制了该方法的实际推广应用。胡加国等^[13]通过在叶尖开槽产生射流,提高了某跨声速压气机的工作效率和稳定裕度,并降低了叶尖间隙内的泄漏强度。

近年来,基于旋涡间的相互作用来控制叶栅内涡系结构的流动控制手段也获得较好的效果,该方法利用涡流发生器诱导生成流向涡,促进主流与壁面附面层间的动量掺混,以达到推迟流动

分离、降低损失的效果。Hergt等^[14]通过在叶栅前缘上游以及叶片吸力面引入被动旋涡发生装置,使压气机总损失降低达9%。Evans等^[15-16]利用与来流成一定夹角的主动射流诱发产生旋涡,以加强附面层内流体与主流间的动量交换,显著改善了叶栅流道后部的流动分离,而射流流量仅占总流量0.13%,该研究还指出为了获得有效的控制效果,射流只需保持附面层不发生分离即可。刘华坪、冯岩岩等^[17-18]开展了端壁射流旋涡发生器控制大折转角扩压叶栅端区流动的数值研究,采用不足叶栅进口流量0.4%的主动射流即可使叶栅总损失减小27.3%。

PJV是基于能量注入和旋涡控制相结合的思想提出的一种新型流动控制手段,利用贯穿压力面和吸力面并与主流以及叶片吸力面成一定夹角的微孔结构,通过压差作用产生PJV,向附面层内直接注入能量的同时促进主流与吸力面附面层流体的动量交换,从而推迟流动分离、减小流动损失。前期研究已验证了该方法的可行性与高效性,本文将对不同攻角时PJV作用下的叶栅流场展开数值研究,结合不同射流参数的影响进一步揭示PJV控制扩压叶栅内流动分离、降低损失的作用机制,验证PJV发生器在变工况条件下的适应性,并总结射流参数的选取原则。

1 计算模型及数值方法

本文的研究对象为一进口马赫数 $Ma=0.67$ 的高速平面扩压叶栅,叶型为NACA 65-K48。叶片弦长 $B=40\text{ mm}$,叶展高度 $H=40.0\text{ mm}$,节距 $t=22.0\text{ mm}$,折转角 $\Delta\theta=42^\circ$,文献[19]给出了该叶栅的详细设计参数以及相应的实验结果。

图1给出了PJV发生器的几何结构和射流参数定义,图中LE和TE分别表示叶栅前缘(leading edge)、尾缘(trailing edge),PS和SS分别表示压力面(suction surface)、吸力面(pressure surface)。如图1(a)所示,PJV发生器为贯穿叶片的等直径圆孔结构,孔径 $\phi=0.5\text{ mm}$ 。PJV发生器在叶片压力面与吸力面压差的作用下形成射流,由于射流流体与主流间存在夹角,两者相互作用形成PJV结构。如图1(b)所示,射流在吸力面的出口与叶片前缘间的轴向距离定义为射流轴向位置 x_j ,与下端壁间的距离定义为射流高度 h ;射

流中心线与当地叶片吸力面切向的夹角定义为射流倾角 α ,射流中心线在叶片吸力面的投影与当地主流方向的夹角定义为射流偏角 β 。当 $\beta < 0^\circ$ 时,射流指向端壁;而当 $\beta > 0^\circ$ 时,射流指向叶展中部。

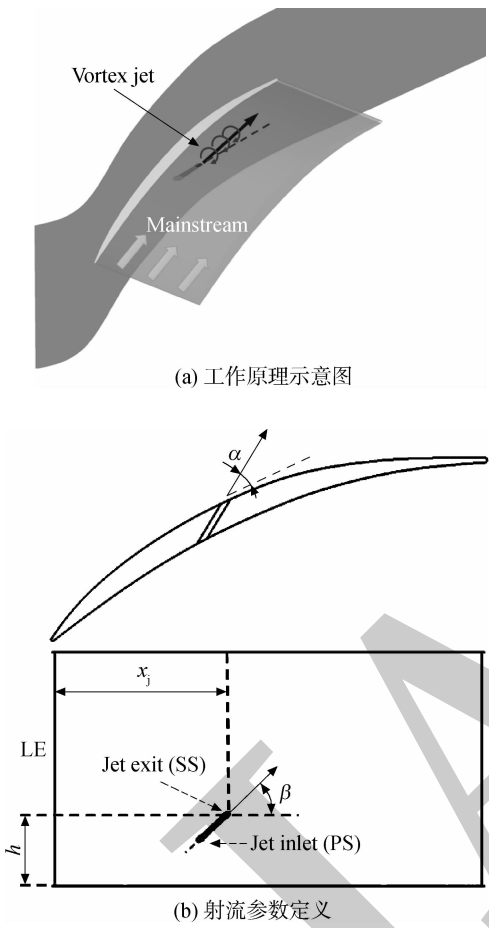


图 1 PJV 发生器示意图
Fig. 1 Schematic of PJV generator

为了保证来流附面层厚度与实验数据^[19]一致,计算域进口取在叶栅上游距前缘 $-2.5B$ 处,出口位于叶栅尾缘下游 $3.0B$ 处。由于叶栅内的流动沿展向具有对称性,仅对半叶高流道进行研究。如图 2 所示,计算域采用结构化网格,网格拓扑结构为 H-O-H。为了保证附面层内的网格密度满足湍流模型需求,对叶片表面和端壁附近的网格进行加密。数值方法验证阶段选取多种湍流模型进行计算,近壁面的网格节点分布根据不同模型的具体要求进行设置。例如,对于 $k-\epsilon$ 模型,壁面网格的 y^+ 最大值约为 30;而对于 SST(shear stress transport)模型,壁面网格的 y^+ 值不大于 1,网格总数都保持在 140 万左右。

图 3 给出了各湍流模型下叶栅出口节距平均

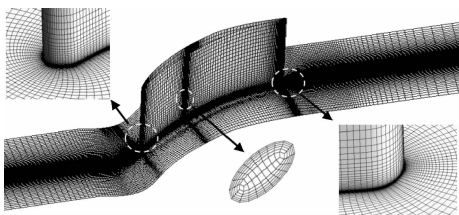


图 2 叶栅流道及射流管计算网格
Fig. 2 Computational grid of the cascade channel and the jet tube

总压损失系数和出口气流角沿展向(z)的分布,其中总压损失系数定义为

$$\omega = (p_{in,t} - p_t) / (0.5 \rho_{in} v_{in}^2) \quad (1)$$

式中 $p_{in,t}$ 和 p_t 分别表示叶栅进口与当地截面的总压, ρ_{in} 和 v_{in} 分别表示叶栅进口截面的密度与速度。由总压损失系数的计算值与实验数据^[19]的对比可知,不同湍流模型对于总压损失的预测差

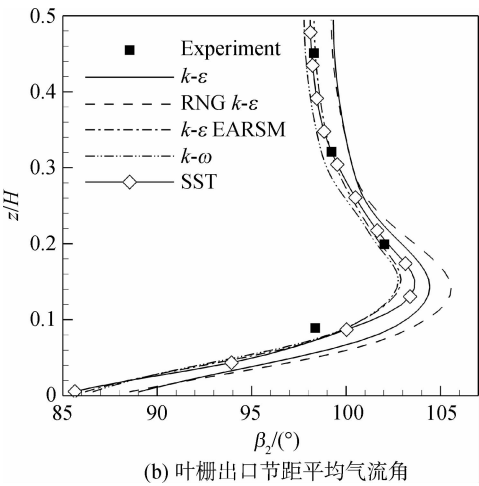
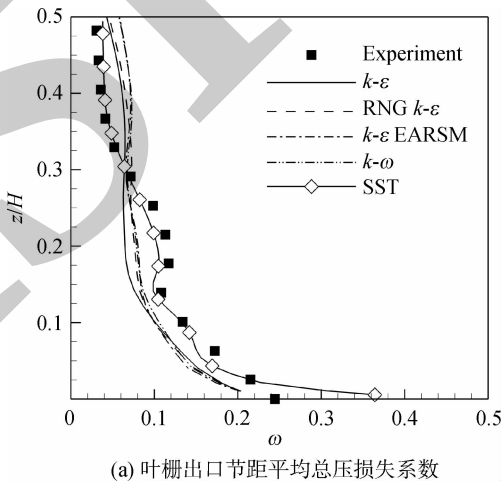


图 3 不同湍流模型的数值结果对比^[19]
Fig. 3 Comparisons of numerical results of different turbulent models^[19]

别较大, SST 模型获得的出口总压损失系数分布与实验结果吻合最好, 而其他几种模型与实验值的偏差较大。对于出口气流角, $k-\epsilon$ EARSM($k-\epsilon$ explicit algebraic Reynolds stress models)、 $k-\omega$ 模型及 SST 模型都能够准确预测出口气流角的分布趋势, 而 $k-\epsilon$ 和 RNG $k-\epsilon$ (renormalization group $k-\epsilon$) 模型计算得到的出口气流角均比实验结果偏大。综合以上分析可知, SST 模型对高速扩压叶栅气动性能的预测最为准确, 能够反映高速扩压叶栅内的真实流动。

图 4 进一步给出了端壁极限流线的实验^[19]与数值结果, 其中数值计算采用 SST 模型。通过对比可知, 数值计算能够较为准确地捕捉叶栅流道内端壁二次流动的发展以及尾缘附近的角区流动分离, 马蹄涡压力面分支到达吸力面后部的位置也与实验结果基本一致。表明上述数值方法能够精确地预测高速扩压叶栅内的流场结构, 可以用于 PJV 控制叶栅内流动分离的研究。

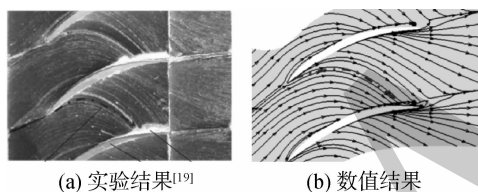


图 4 端壁极限流线

Fig. 4 Limiting streamlines on the endwall

2 计算结果与讨论

2.1 零攻角下 PJV 的作用机理分析

为了揭示 PJV 推迟流动分离、降低损失的作用机理, 首先对设计攻角 PJV 作用下的流场结构进行分析, 其中射流轴向位置 $x_j/B_x = 40\%$, 射流高度 $h/H = 15\%$, 射流偏角 $\beta = 60^\circ$, 射流倾角 $\alpha = 30^\circ$ 。

图 5 给出了有/无 PJV 控制时叶栅流道内轴向涡量 Ω_x 的对比, 图中选取的 3 个轴向截面分别位于 $x/B_x = 52\%$ 、 $x/B_x = 65\%$ 和 $x/B_x = 80\%$ 。如图 5(a) 所示, 无流动控制时, 随着端壁低能流体的横向迁移及其在吸力面/端壁角区内堆积的增加, 通道涡(PV)逐渐脱离端壁并向叶展中部扩展, 吸力面附面层在通道涡的挤压和诱导作用下产生了与其旋向相反的壁面涡(WV)结构, 如图 5(a)中 $x/B_x = 65\%$ 截面所示。通道涡和壁面涡在 $x/B_x = 80\%$ 截面已充分发展, 其影响范围也显

著增大。在通道涡展向发展的推挤作用下, 壁面涡演化为两个分支, 靠近端壁的分支 WV-1 逐渐抬升并远离吸力面, 而靠近中径的分支 WV-2 紧贴叶片吸力面向叶展中部延伸。对于 PJV 控制方案(图 5(b)), 射流流体与主流相互作用形成了与壁面涡旋向相反的反 PJV, 射流旋涡作用于通道涡、壁面涡等涡系结构, 使叶栅内的流场结构得到重新组织。具体来说, 在 PJV 的下洗区即近端壁侧, 主流高动量流体被输运至吸力面附面层内, 提高了下洗侧流体的能量水平, 从而减小了壁面涡的近端壁分支 WV-1 的影响范围; 而在近叶展中部一侧, PJV 的上洗作用将附面层低能流体向主流输运, 一方面增强了该区域流体间的掺混效应, 另一方面也对壁面涡的近叶展中部分支 WV-2 产生挤压作用, 促使其进一步向中径处迁移, 增大其影响范围与强度。虽然微孔结构的射流流量较小(仅为叶栅进口流量的 0.27%), PJV 也由于流体的黏性耗散而迅速衰减, 但微弱 PJV 带来的局部能量掺混通过对壁面涡等涡系结构的重新组织, 显著影响了流道内三维流场结构的演化以及叶栅的气动特性。

PJV 对叶栅内涡系结构的作用也使得损失得到重新分布, 图 6 给出了流道内分别位于 $x/B_x = 52\%$ 、 $x/B_x = 65\%$ 和 $x/B_x = 80\%$ 轴向截面的总压损失系数(ω)分布。如图 6(b) 所示, 射流流体直接作用于角区高损失区, 使其被分为上、下两部分, 分别形成两个独立的损失核心。在 PJV 的下洗区, 吸力面/端壁角区内流体的能量由于主流高速流体的注入而提高, 壁面涡近端壁分支 WV-1 的减弱也推迟了该区域的流动分离, 从而降低了近端壁区由于低能流体堆积以及流动分离而造成的损失, 因此靠近端壁一侧高损失区的范围及总压损失系数相比无控制时明显减小。然而, PJV 的上洗作用促使壁面涡近中径分支 WV-2 进一步向叶展中部迁移, 增大了附面层低能流体与主流的掺混损失, 导致近叶展中部一侧的损失增大。

叶型损失是衡量叶片气动设计或流动控制效果的重要指标之一, 根据本文叶栅通道内的流动特征可将总压损失系数分为叶型损失与二次流损失, 中径区域的损失即为叶型损失。为了定量分析 PJV 对以上两者的影响, 表 1 对比了流动控制前后的各项损失系数。研究结果表明, 设计攻角下的 PJV 使叶栅出口总压损失系数降低了 5.2% , 主要来自于对角区损失的有效控制。PJV

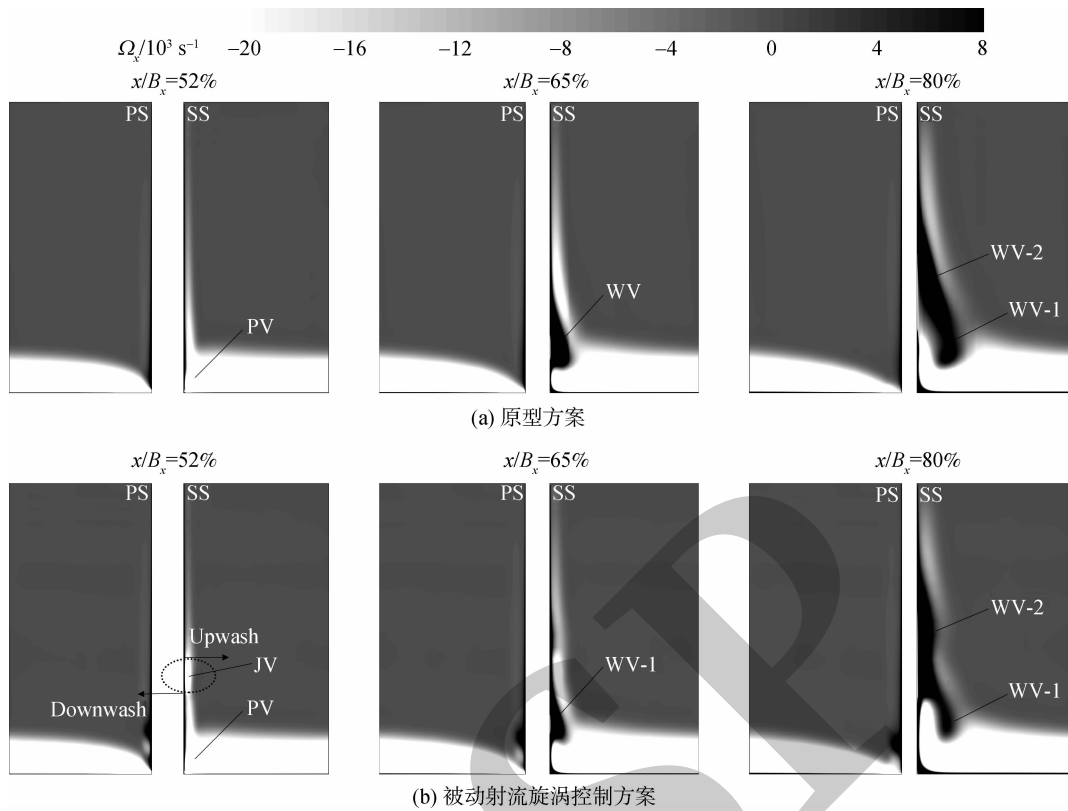


图 5 设计攻角时不同轴向截面的轴向涡量云图

Fig. 5 Contours of axial vorticity on different axial sections under the designed angle of attack

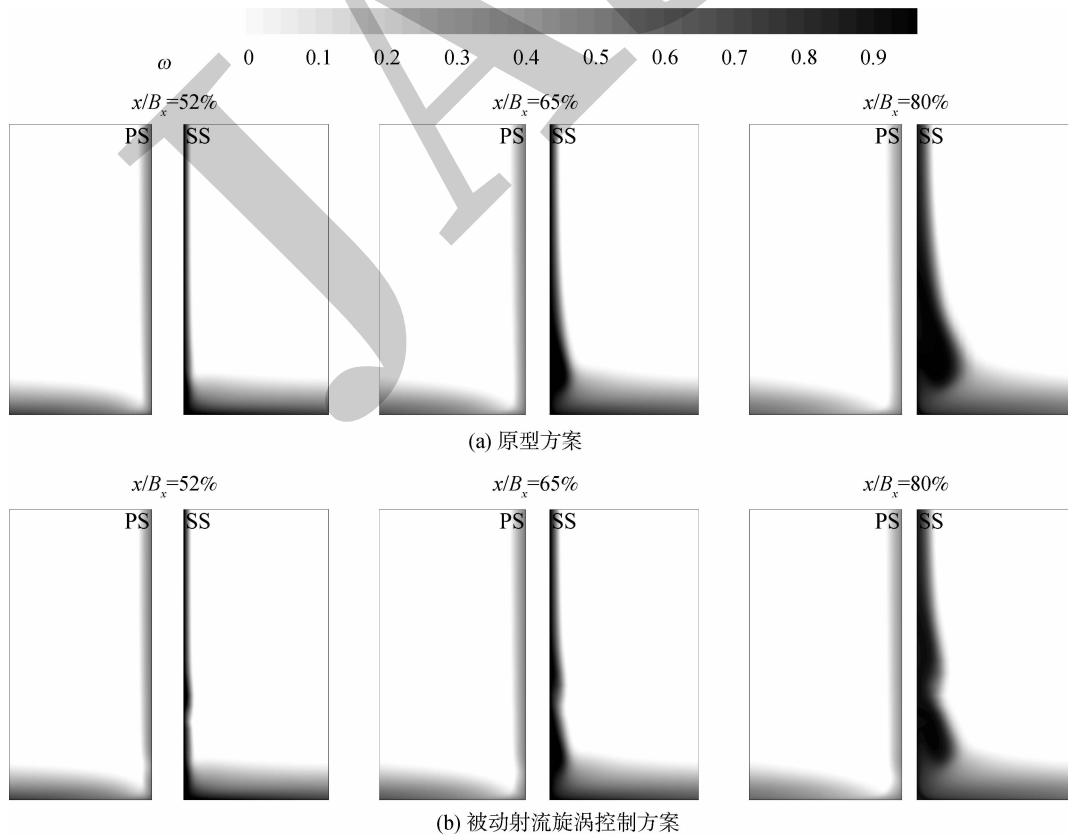


图 6 设计攻角时不同轴向截面的总压损失系数云图

Fig. 6 Contours of total pressure loss coefficient on different axial sections under the designed angle of attack

通过上洗将附面层低能流体向主流输运,从而造成该区域的掺混损失增大,即叶型损失相比原型方案增加;而 PJV 在近端区的下洗效果显著,高速主流流体的注入使得当地附面层厚度减小,并推迟了角区流动分离,二次流损失的降幅高达 10.9%。

表 1 流动控制前后的总压损失系数对比
Table 1 Comparison of total pressure loss coefficient before and after flow control

参数	原型方案	PJV 方案	变化量/%
总压损失系数	0.0980	0.0929	-5.2
叶型损失系数	0.0162	0.0218	5.7
二次流损失系数	0.0818	0.0711	-10.9

图 7 给出了叶栅出口截面的轴向速度 V_x 和二次流速度矢量分布。由原型叶栅出口的轴向速度分布可知,叶栅吸力面尾缘的流动分离以及角

区内低能流体的堆积,导致叶栅出口角区存在大面积的低能流体聚集区,严重影响了叶栅的流通能力,是造成叶栅损失较大的主要原因。采用 PJV 控制后,叶栅出口处的低能流体区得到重新分布。对于端区附近的流场,PJV 的下洗作用提高了该区域流体的动量,因而低速流体区的周向范围大大减小;而对于靠近叶展中部的低能流体区,PJV 上洗作用对壁面涡分支 WV-2 的推挤以及由此导致的流体掺混效应的增强,造成该位置低能流体区的展向范围明显增大,中径处的尾迹宽度也由于角区分离区向叶展中部的扩展而略有增加,以上现象表明 PJV 作用下叶栅出口的流场分布更加均匀。

由二次流的分布规律可知,叶栅出口流场以通道涡和集中脱落涡为主要特征。对比流动控制前后的涡系结构分布可知,PJV 的下洗作用减少了角区低能流体的堆积,从而抑制了通道涡的发展,并导致其影响范围大幅度减小,是叶栅气动性能得以改善的最主要的原因。尽管 PJV 的上洗作用使得集中脱落涡的周向和展向尺寸均比原型叶栅略有增大,并小幅度恶化了局部区域的流动情况,但相比 PJV 下洗作用带来的气动性能改善,其影响程度较弱,因而 PJV 控制下叶栅的气动性能得到提升。

2.2 变攻角下 PJV 的控制效果

作为一种被动流动控制手段,有必要对 PJV 在变工况条件下的适应特性进行探讨。图 8 给出了不同轴向位置 PJV 在不同攻角(i)时对叶栅出口总压损失系数变化量的影响,其中射流轴向位置分别为 $x_j/B_x=30\%,35\%,40\%$ 和 50% ,射流高度 $h/H=15\%$,射流偏角 $\beta=60^\circ$,射流倾角 $\alpha=30^\circ$ 。总体而言,不同轴向位置的 PJV 对叶栅损失的改善效果随着攻角的改变呈现出相同的变化趋势:当攻角为负时,PJV 的控制效果较弱;随着攻角的增大,其对叶栅内流动的改善效果逐渐增强,并在攻角 $i=2^\circ$ 时获得最佳控制效果;继续增大来流角度将会减弱 PJV 的控制效果。在攻角 $i=-2^\circ\sim 2^\circ$ 范围内, $x_j/B_x=40\%$ 方案的流动控制效果最佳, $i=2^\circ$ 时总压损失系数的相对降低量约为 7.8%,明显大于设计攻角下的改善效果,此时的射流流量仅为叶栅进口流量 0.28%。与之相比,更为靠近叶栅前缘的 $x_j/B_x=30\%$ 和 $x_j/B_x=35\%$ 方案在负攻角时的控制效果较差,当攻角增大至 $i=4^\circ$ 时,其控制效果与 $x_j/B_x=40\%$

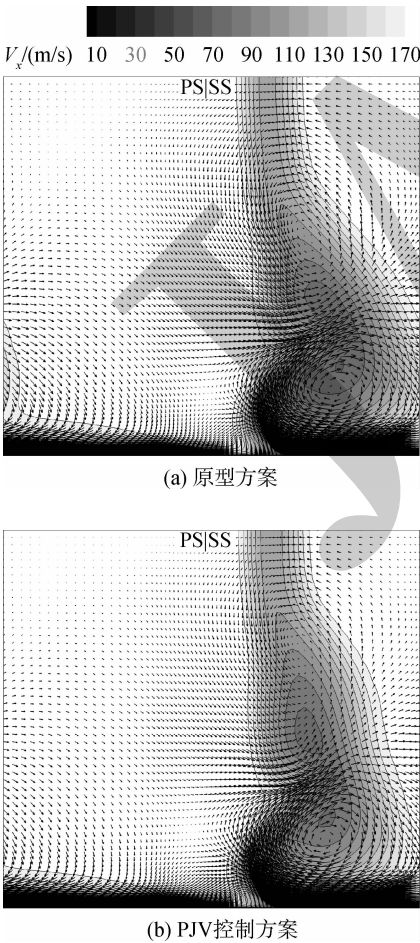


图 7 叶栅出口轴向速度云图以及二次流矢量分布
Fig. 7 Contours of axial velocity and the secondary flow vectors at the cascade outlet

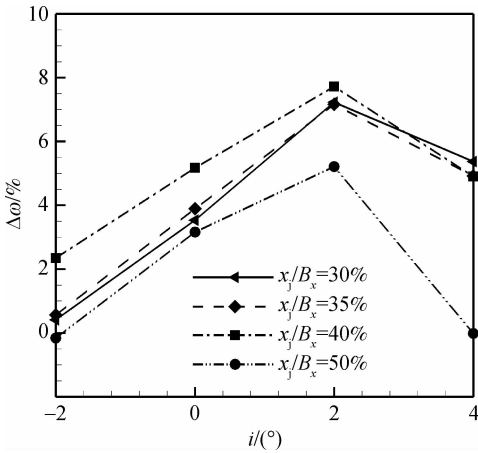


图 8 变攻角时不同射流位置的总压损失总压系数变化量

Fig. 8 Total pressure loss coefficient variation for different jet locations under different angles of attack

方案相当。此外,靠近叶栅尾缘的 $x_j/B_x = 50\%$ 方案的控制效果最差,尤其是在正攻角来流条件下,具体的原因将在下文给出。

为了深入分析变攻角条件下 PJV 的轴向位置对流场结构的影响,图 9 给出了攻角 $i=2^\circ$ 时原型叶栅及 $x_j/B_x = 40\%$ 、 $x_j/B_x = 50\%$ 方案的轴向涡量分布。由涡系结构的发展可知,当射流轴向位置 $x_j/B_x = 40\%$ 时,由于射流的作用位置更加靠近上游,射流出口处的附面层厚度相对较小,PJV 的衰减缓慢,在 $x/B_x = 65\%$ 截面仍可观察到较为明显的射流旋涡结构。壁面涡在 $x/B_x = 80\%$ 截面已得到充分发展,靠近叶展中部的壁面涡分支 WV-2 在 PJV 的上洗作用下向中径处迁移并略有抬升,其影响范围相比原型叶栅小幅增加。同时,PJV 的下洗作用大幅减小了壁面涡分支 WV-1 的影响范围与强度,并促进通道涡脱离端壁附面层向角区发展。当射流的轴向位置 $x_j/B_x = 50\%$ 时,PJV 下洗作用引入的高动量流体有效减弱了壁面涡近端壁分支 WV-1 的影响范围及强度,其作用效果略好于 $x_j/B_x = 40\%$ 方案。然而,由于射流轴向位置更加靠近下游,射流出口处的附面层厚度较大,PJV 上洗作用运输的低动量流体对壁面涡发展的影响更为显著,在 $x/B_x = 65\%$ 截面内已形成尺寸较大的壁面涡近中径分支 WV-2。随着壁面涡进一步向下游发展,其近中径分支 WV-2 的影响范围沿展向和周向不断扩大,并在 $x/B_x = 80\%$ 截面从叶片吸力面脱落,与周围流场相互作用产生强烈的掺混。

图 10 和图 11 进一步给出了与图 9 中各工况

对应的叶片吸力面极限流线以及流道内不同轴向截面的总压损失系数分布,其中图 10(b)和图 10(c)以管状流线刻画射流流体向下游的发展。与设计攻角不同,当攻角增大至 $i=2^\circ$ 时,由于叶栅流道内的轴向逆压力梯度增强,导致附面层厚度增大、角区分离提前,因而分离区内的掺混将更加剧烈、角区高损失区的范围也更大,但损失核心处的总压损失系数略有降低。对于 $x_j/B_x = 40\%$ 方案,射流出口位于分离区上游,PJV 经过进入分离区前的稳定发展,有效推迟了下游的角区流动分离。结合轴向涡量与总压损失系数的分布可以看出,PJV 作用下的壁面涡近中径分支 WV-2 与主流及吸力面附面层流体的剪切、掺混增强,造成该区域高损失区的范围以及损失值增大;而由壁面涡近端壁分支 WV-1 主导的端区高损失区的范围相比原型叶栅明显减小,这与 PJV 的下洗作用密切相关。对比 $x_j/B_x = 50\%$ 方案可以发现,此时的射流出口位于分离区内,射流流体尚未形成稳定的 PJV 即与分离区内的低能流体相互作用,强烈的掺混与耗散导致 PJV 无法有效推迟流动分离。由总压损失系数及轴向涡量的分布还可知,壁面涡近端壁分支 WV-1 的影响范围明显小于 $x_j/B_x = 40\%$ 方案,因而对应的近端壁侧的高损失区也较小。然而, $x_j/B_x = 50\%$ 方案壁面涡近中径分支 WV-2 尺寸的增大,导致与周围流体间的剪切、掺混损失大幅增加,如图 11(c)中 $x/B_x = 80\%$ 截面所示,这是该方案控制效果较差的主要原因。

根据以上分析可知,保证射流出口位于角区分离线上游,使 PJV 在进入分离区之前稳定发展是获得理想控制效果的重要条件。此外,由于正攻角来流条件下的角区流动分离将会提前,因而射流轴向位置不宜过于靠近下游,应在合理的范围内考虑其变工况适应特性,增强 PJV 发生器的变工况控制能力。

上文已对变攻角条件下射流轴向位置对 PJV 作用效果的影响展开分析,下面选取射流轴向位置 $x_j/B_x = 40\%$ 、射流高度 $h/H = 15\%$ 、射流偏角 $\beta = 60^\circ$ 、射流倾角 $\alpha = 30^\circ$ 的方案,分析不同攻角时的叶栅气动特性。图 12 给出了不同攻角下原型方案(Ori)和有 PJV 控制方案(Jet)时,叶栅出口节距平均静压系数的展向分布,静压系数由下式求得:

$$C_p = (p - p_{in}) / (0.5 \rho_{in} v_{in}^2) \quad (2)$$

式中 p_{in} 和 p 分别表示叶栅进口与当地截面的静

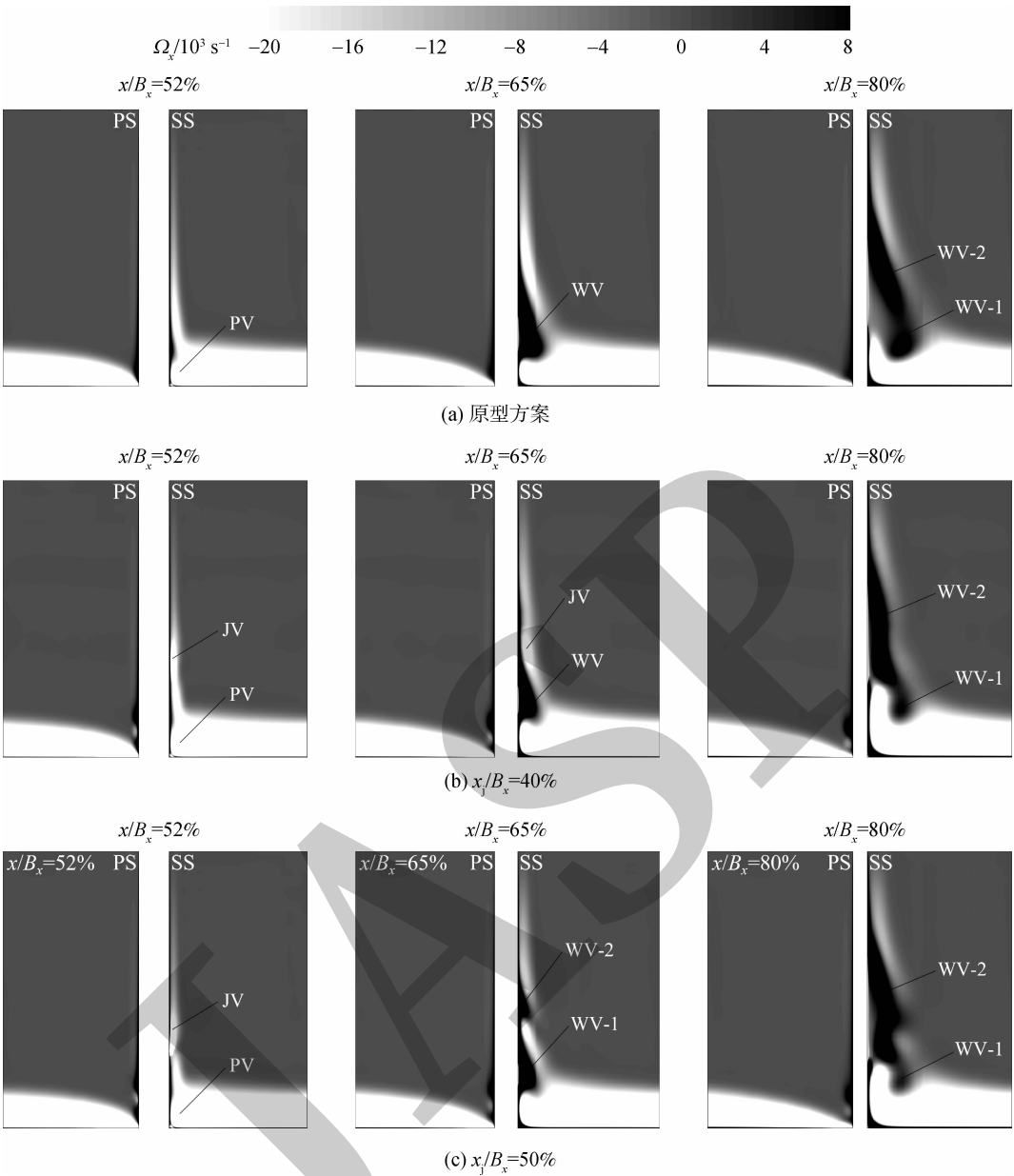


图 9 不同射流位置的轴向涡量云图($i=2^\circ$)
Fig. 9 Contours of axial vorticity for different jet locations ($i=2^\circ$)

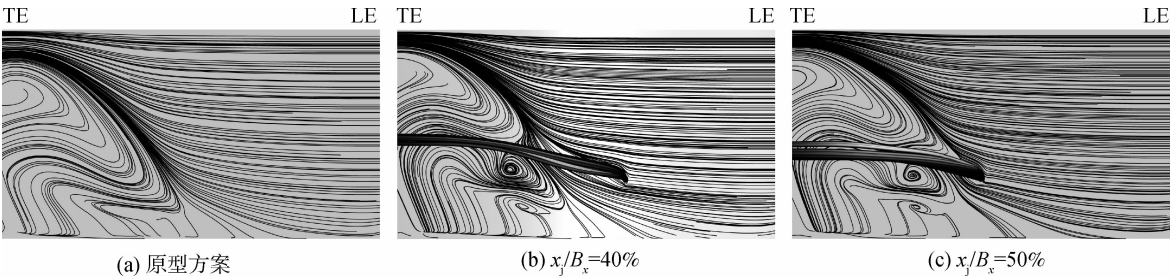


图 10 不同射流位置的吸力面极限流线分布($i=2^\circ$)
Fig. 10 Limiting streamlines on the blade suction surface for different jet locations ($i=2^\circ$)

压。在给定的攻角范围内,与原型方案相比,PJV 均能够在全叶高范围内增大叶栅出口气流的静压系数,提高叶栅的扩压能力。对比不同攻角下的

改善幅度还可知,当攻角 $i=2^\circ$ 时,叶栅出口静压系数的提高幅度最大,约为 2.7%;而当攻角 $i=-2^\circ$ 时,PJV 对叶栅扩压能力的改善效果非常

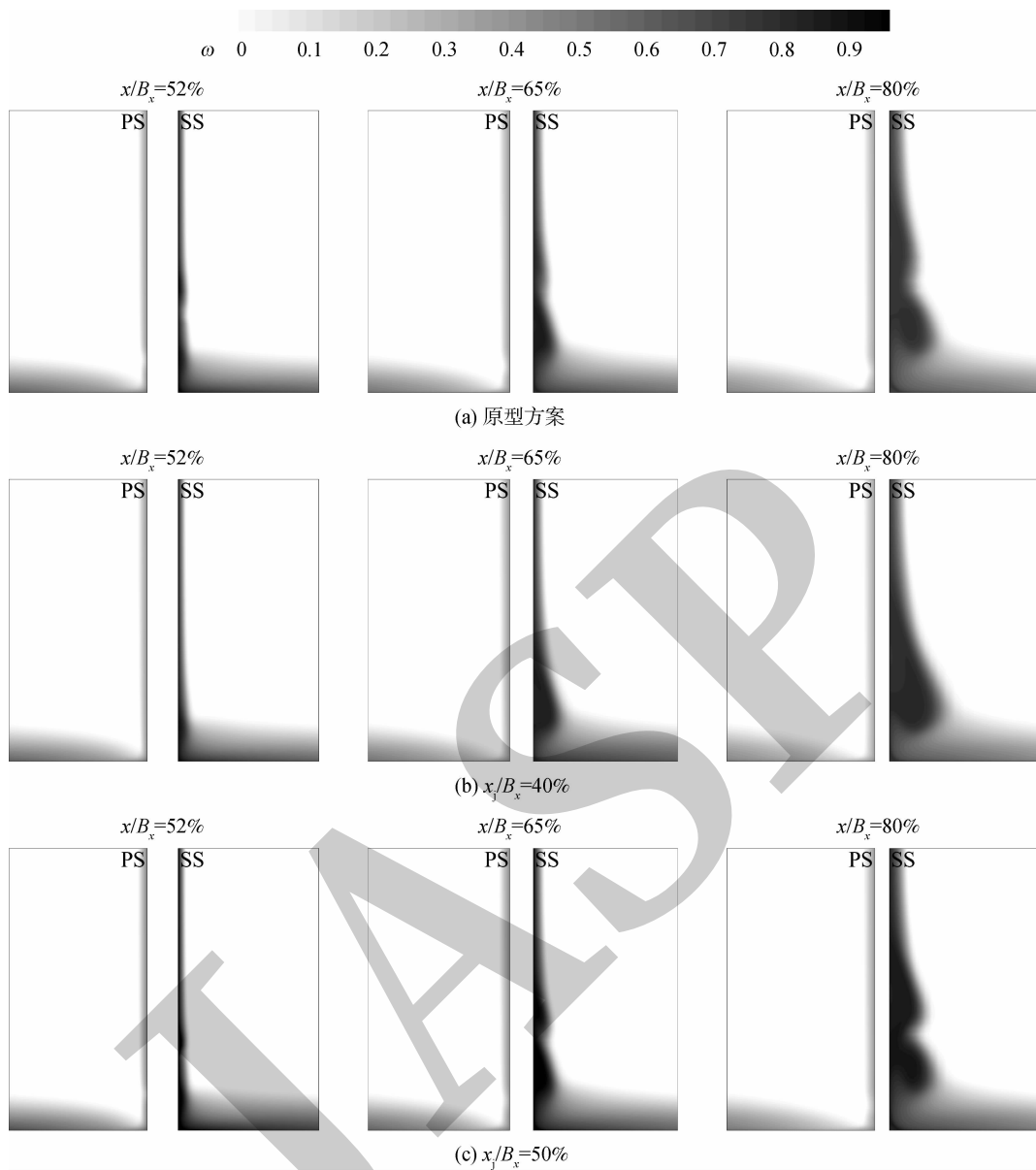


图 11 不同射流位置的总压损失系数云图($i=2^\circ$)

Fig. 11 Contours of total pressure loss coefficient for different jet locations ($i=2^\circ$)

微弱。

图 13 给出了有/无 PJV 控制时不同攻角下叶栅出口截面的总压损失系数云图分布,图中黑色实线表示 $\omega=0.4$ 的等值线。对于原型方案(无流动控制),在负攻角来流条件下,叶栅出口角区高损失区的分布范围最广,且总压损失系数也较高;随着攻角的增加,吸力面附面层厚度不断增大、角区分离区向上游延伸,加剧了低能流体在吸力面/端壁角区的滞留与掺混,造成叶栅出口的尾迹宽度比设计攻角明显增大,但角区高损失区的范围及总压损失系数明显减小,并在攻角 $i=2^\circ$ 时出口总压损失系数达到最小值。当攻角增大至 $i=4^\circ$ 时,虽然角区高损失区的总压损失系数进一

步减小,但尾迹宽度的大幅增加造成叶栅出口的总压损失系数仍较大。采用 PJV 控制后,各攻角下叶栅出口总压损失系数的变化趋势一致:角区高损失区沿展向 PJV 分为两部分,靠近端壁一侧的高损失区的范围及总压损失系数明显减小,而靠近叶展中部区域的高损失核心的展向尺寸明显增大。PJV 的控制效果取决于其在全叶高范围内的综合作用,如图 13(b) 所示,随着攻角的增大,PJV 减小叶栅端区损失的效果先增强、后减弱,尤其以攻角 $i=0^\circ$ 和 $i=2^\circ$ 时的总压损失系数降低幅度最为明显;而对于靠近中径一侧的高损失区,不同攻角下的变化幅度相对较小,其中 $i=2^\circ$ 时的总压损失系数增加量最小。因此,当 $i=2^\circ$

时,PJV 作用下叶栅出口总压损失系数的降低幅度最大。

为了更进一步分析 PJV 在不同攻角时的控制效果,图 14 给出了 $i=-2^{\circ}$ 和 $i=2^{\circ}$ 时不同叶高处的叶片表面静压系数分布,其中 $7\% H$ 和 $15\% H$ 分别对应射流进口与出口。研究表明,PJV 造成射流进、出口附近出现压力阶跃现象,其中吸力面射流出口上游的叶片表面静压急剧增大,下游的叶片表面静压大幅降低,而压力面射流进口附近的阶跃压力分布规律与吸力面恰好相反,这是因为 PJV 形成过程中造成射流进、出口附近局部流场的速度急剧改变。当 $i=-2^{\circ}$ 时,PJV 对压力面的静压分布几乎没有影响,仅使得吸力面尾缘附近的静压略有提高,如图 14(a) 所示。当攻角增大至 $i=2^{\circ}$ 时, $x/B_x=73\%$ 下游的叶片表面静压均有所增加,尤其是吸力面尾缘静压。虽然 PJV 的作用位置均位于角区分离线上游,但当攻角为正时,吸力面的角区分离向上游延伸,射流出口与分离区之间的距离较短,PJV 作用于分离区前的耗散较少,因而控制效果较好。

叶栅出口气流的均匀性是衡量 PJV 控制效果的另一项重要指标。如图 15 所示,分别给出了 $i=-2^{\circ}$ 和 $i=2^{\circ}$ 时 PJV 作用下叶栅出口节距平均气流角(β_2)的展向分布。与出口总压损失系数的分布规律相似, β_2 沿叶高的变化也可以根据 PJV 的上洗、下洗作用分为两部分。对于靠近端壁的下洗区,PJV 把主流高动量流体向附面层内输

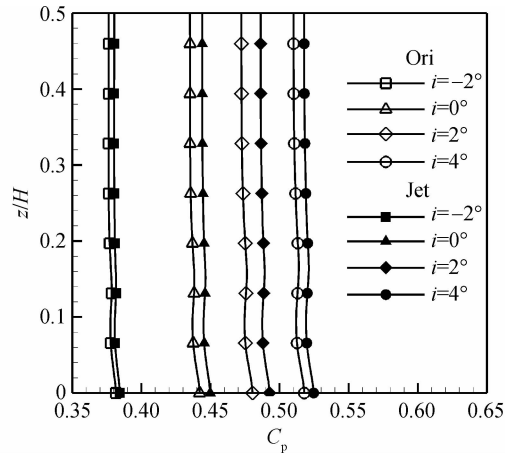


图 12 不同攻角时叶栅出口节距平均静压系数展向分布
Fig. 12 Pitch-averaged static pressure coefficient along the span at the cascade outlet for different angles of attack

运,增大了该区域流体的能量,使得气流抵抗流向逆压力梯度及流道内横向压力梯度的能力增强,因而气流的折转能力提高。但是,对于靠近叶展中部的区域,PJV 上洗作用造成的流体掺混效应小幅度降低了该区域气流的动量,并导致其抵抗流向逆压力梯度的能力减弱,从而使得气流的折转能力也相应地降低,两者综合作用下叶栅出口气流沿展向的分布更加均匀。对比不同攻角下的出口气流角分布可知,由 PJV 上洗作用所导致的叶片中径处出口气流角的增大幅度大致相当,而 PJV 下洗作用对角区气流折转能力的改善幅度在攻角 $i=2^{\circ}$ 时更大,即正攻角条件下 PJV 对气

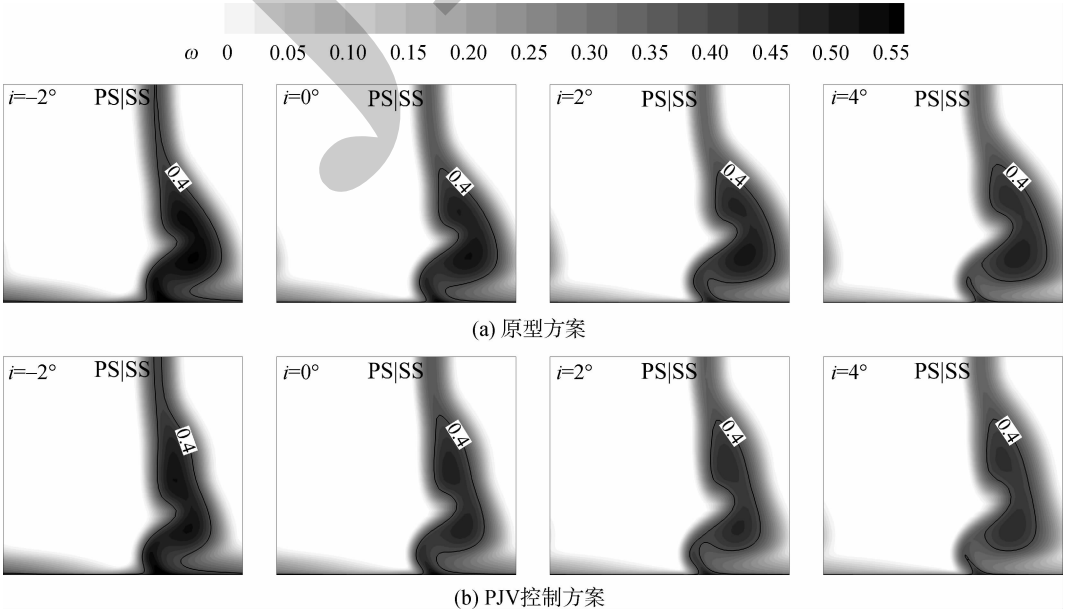


图 13 不同攻角时叶栅出口总压损失云图

Fig. 13 Contours of total pressure loss coefficient at the cascade outlet for different angles of attack

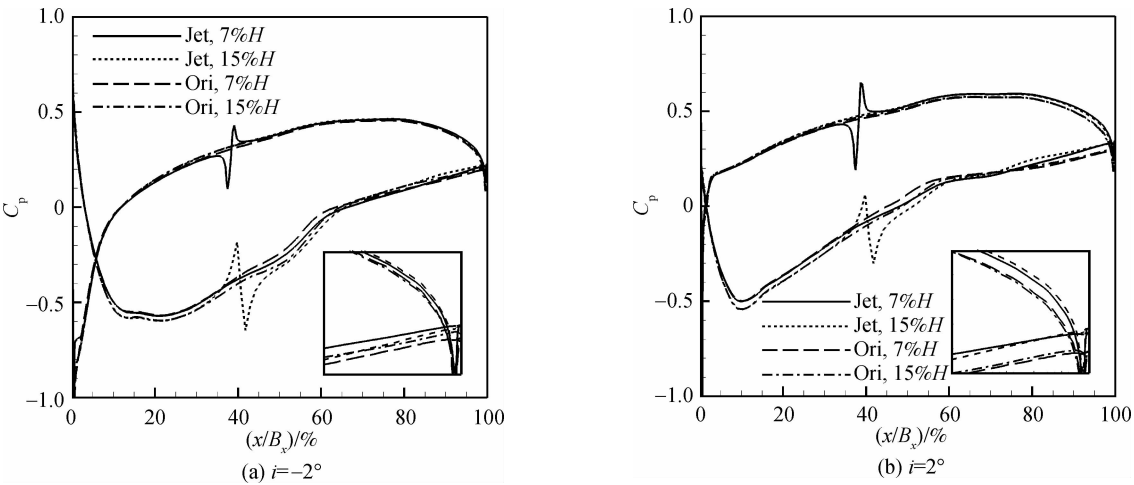


图 14 不同攻角时叶片表面静压系数分布

Fig. 14 Distribution of surface static pressure coefficient for different angles of attack

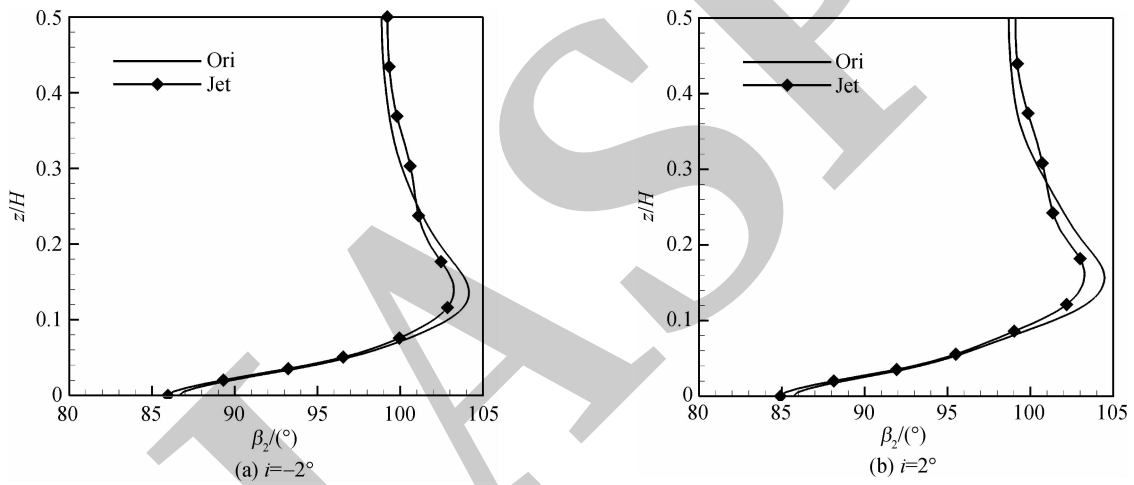


图 15 不同攻角时叶栅出口节距平均气流角分布

Fig. 15 Distribution of pitch-averaged out flow angle at the cascade outlet for different angles of attack

流折转能力、出口气流均匀性的改善效果更好。

3 结 论

采用贯穿叶片的 PJV 发生器控制高速扩压叶栅内的流动分离,并在设计攻角及变攻角条件下对其展开数值研究,获得如下结论:

1) PJV 发生器具有无需复杂管路、结构简单、尺寸微小等优异特性,在设计攻角下可使叶栅总压损失降低 5.2%,变攻角条件下最大可使叶栅总压损失降低 7.8%,而此时的射流流量仅为叶栅进口流量的 0.28%,表明其具有较高的控制效率。

2) PJV 的下洗作用把主流高动量流体注入附面层,减小了壁面涡近端壁分支 WV-1 的范围与强度,并抑制了通道涡的发展,这是叶栅气动性

能得以改善的主要原因;而 PJV 上洗区的掺混、挤压效应促使壁面涡近中径分支 WV-2 向叶展中部迁移,在提高流动均匀性的同时也增大了集中脱落涡的尺寸,但其影响程度相对较小,两者综合作用下叶栅的气动性能提高。

3) PJV 具有良好的变攻角适应特性,在攻角 $i = -2^\circ \sim 4^\circ$ 范围内,能够有效降低叶栅内的流动损失,提高其扩压能力,并改善出口气流的均匀性。随着攻角的增大,角区分离向上游延伸,射流出口与分离区之间的距离减小,射流旋涡进入分离区前能够稳定地发展且耗散较小,流动控制效果增强;而当攻角过大时,射流出口过于靠近甚至会进入分离区内,PJV 与分离区低能流体的相互作用导致其迅速耗散,造成控制效果明显下降。

4) 射流轴向位置对 PJV 的控制效果影响很

大。在综合考虑变攻角流场特性的前提下,应使 PJV 的轴向位置位于分离区上游不远处,本文的最佳射流轴向位置位于距叶片前缘 40% 轴向弦长处。

参考文献:

- [1] HOSNY W, TABAKOFF W. An analysis of losses and secondary flow in turbine cascades[R]. Cincinnati, US: University of Cincinnati, 1971.
- [2] CULLEY D E, BRIGHT M M, PRAHST P S, et al. Active flow separation control of a stator vane using surface injection in a multistage compressor experiment [R]. ASME Paper GT2003-38863, 2003.
- [3] WIEDERHOLD O, HECKLAU M, KING R, et al. Multi-variable control in a critically loaded compressor cascade [J]. International Journal of Flow Control, 2011, 2(4): 219-236.
- [4] HECKLAU M, SALAZAR D P, NITSCHKE W. Influence of the actuator jet angle on the reattachment process with pulsed excitation [M]. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [5] ZANDER V, NITSCHKE W. Control of secondary flow structures on a highly loaded compressor cascade [J]. Journal of Power and Energy, 2013, 227(6): 674-682.
- [6] 徐大懋. 压气机弦向缝隙叶栅的研究[R]. 哈尔滨: 哈尔滨汽轮机厂研究所, 1980.
- [7] SONG Yanping, CHEN Huanlong, CHEN Fu, et al. Effects of air injection on performance of highly-loaded compressor cascades[R]. ASME Paper GT2007-27062, 2007.
- [8] 陈浮, 陈焕龙, 冯冬民. 高负荷缝隙弯曲扩压叶栅尾迹特性实验[J]. 推进技术, 2009, 30(2): 197-201.
CHEN Fu, CHEN Huanlong, FENG Dongmin. Experimental on wake characteristics in compound lean compressor cascades with slots injection[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(2): 197-201. (in Chinese)
- [9] 周敏, 王如根, 张相毅, 等. 改变开孔位置对风扇叶片气动特性的影响[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(5): 359-361.
ZHOU Min, WANG Rugen, ZHANG Xiangyi, et al. Effect of hole position on the pneumatic performance of fan blade [J]. Turbine Technology, 2007, 49(5): 359-361. (in Chinese)
- [10] 周敏, 王如根, 曾令君, 等. 槽道宽度对压气机叶栅气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 1077-1081.
ZHOU Min, WANG Rugen, ZENG Lingjun, et al. Effect of slot width on the aerodynamic performance of compressor cascade[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 1077-1081. (in Chinese)
- [11] 吴培根, 王如根, 罗凯, 等. 开槽叶片对大转角扩压叶栅性能的影响[J]. 航空动力学报, 2013, 28(11): 2503-2509.
WU Peigen, WANG Rugen, LUO Kai, et al. Effect of slotted blade on performance of high-turning angle compressor cascade[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(11): 2503-2509. (in Chinese)
- [12] 吴培根, 王如根, 胡加国, 等. 槽道出口位置对高负荷扩压叶栅性能的影响[J]. 热能动力工程, 2014, 29(2): 121-126.
WU Peigen, WANG Rugen, HU Jianguo, et al. Influence of the location of the slot at the outlet on the performance of a highly-loaded diffusion cascade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2014, 29(2): 121-126. (in Chinese)
- [13] 胡加国, 王如根, 李坤, 等. 跨声速压气机叶尖开槽射流扩稳策略探究[J]. 推进技术, 2014, 35(11): 1475-1481.
HU Jianguo, WANG Rugen, LI Kun, et al. Investigation on slot jetting flow method and mechanism of transonic compressor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(11): 1475-1481. (in Chinese)
- [14] HERGT A, MEYER R, ENGEL K. Effects of vortex generator application on the performance of a compressor cascade[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(2): 021026. 1-021026. 10.
- [15] EVANS S, HODSON H, HYNES T, et al. Controlling separation on a simulated compressor blade using vortex-generator jets[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(4): 819-827.
- [16] EVANS S, COULL J, HANEEF I, et al. Minimizing the loss produced by a turbulent separation using vortex generator jets[J]. AIAA Journal, 2012, 50(4): 778-787.
- [17] 刘华坪, 陈焕龙, 李德雄, 等. 射流旋涡发生器控制大折转角扩压叶栅二次流[J]. 航空动力学报, 2015, 30(4): 838-845.
LIU Huaping, CHEN Huanlong, LI Dexiong, et al. Secondary flow control in high-turning compressor cascade using vortex generator jet[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(4): 838-845. (in Chinese)
- [18] 冯岩岩, 宋彦萍, 刘华坪, 等. 不同攻角下端壁射流旋涡控制扩压叶栅分离流动研究[J]. 推进技术, 2015, 36(1): 54-60.
FENG Yanyan, SONG Yanping, LIU Huaping, et al. Effects of end-wall vortex generator jet on flow separation control in compressor cascade under different angles of attack[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(1): 54-60. (in Chinese)
- [19] HERGT A, ROBERT M, KARSTEN L, et al. A new approach for compressor endwall contouring[R]. ASME Paper GT2011-45858, 2011.

(编辑: 陈 越)