

基于抽吸的亚声速平面叶栅风洞流场品质控制研究*

蔡明, 高丽敏, 刘哲, 程昊, 刘波, 黎浩学

(西北工业大学 动力与能源学院 翼型、叶栅空气动力学国家级重点实验室, 陕西 西安 710129)

摘要: 为提升平面叶栅风洞流场品质, 获取高质量、低不确定性的试验结果, 设计了位于试验段上侧壁不同位置处的两种抽吸方案, 采用数值模拟方法研究了抽吸槽位置以及抽吸流量对平面叶栅风洞流场品质的控制效果。研究表明: 在试验段上侧壁进行抽吸能够提升靠近上侧壁的三个叶栅通道的均匀性和周期性, 使进口马赫数偏差 <0.01 , 进气角偏差 $<0.5^\circ$; 在可移动上侧壁和叶栅首叶片之间进行抽吸 (Cavity A) 对叶栅进口均匀性提升较大, 但对出口周期性提升很小; 在叶栅首叶片吸力面中后部进行抽吸 (Cavity B) 能够同时提升进口均匀性和出口周期性; Cavity A 抽吸方案比 Cavity B 具有更好的工程应用性, 但临界抽吸流量增加了两倍。

关键词: 叶轮机械; 平面叶栅; 风洞; 流场; 抽吸; 数值模拟

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2021) 09-1985-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190873

Flow Field Quality Control of Subsonic Linear Cascade Wind Tunnel Based on Suction

CAI Ming, GAO Li-min, LIU Zhe, CHENG Hao, LIU Bo, LI Hao-xue

(National Key Laboratory of Aerodynamic Design and Research, School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Improving the flow quality of linear cascade wind tunnel is particularly important for obtaining high-quality, low-uncertainty test results. Two suction schemes are set at different positions on the upper side of the test section and the effect of suction slot position and suction flow rate on the flow field quality of cascade wind tunnel flow are investigated by numerical simulation. The results show that the upper sidewall suction was demonstrated to be effective in improving inflow uniformity and outflow periodicity of these three blade passages near upper sidewall, among which the inlet Mach number deviation is no more than 0.01, and the flow angle deviation is no more than 0.5° . Suction between the movable upper wall and the first blade (Cavity A) can effectively improve the inflow uniformity of the cascade, but the outflow periodicity increases little. Suction at the middle back of suction side of the first blade (Cavity B) can both improving the quality of inflow and outflow. The suction scheme of Cavity A is more flexible in engineering application than the suction scheme of Cavity B, but the critical suction flow rate has tripled.

Key words: Turbomachinery; Linear cascade; Wind tunnel; Flow field; Suction; Numerical simulation

* 收稿日期: 2019-12-18; 修订日期: 2020-02-19。

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-II-0001-0013); 引智计划 (B17037); 国家自然科学基金重点项目 (51790512)。

作者简介: 蔡明, 博士生, 研究领域为叶轮机械气动热力学。

通讯作者: 高丽敏, 博士, 教授, 研究领域为叶轮机械气动热力学。

引用格式: 蔡明, 高丽敏, 刘哲, 等. 基于抽吸的亚声速平面叶栅风洞流场品质控制研究[J]. 推进技术, 2021, 42(9): 1985-1992. (CAI Ming, GAO Li-min, LIU Zhe, et al. Flow Field Quality Control of Subsonic Linear Cascade Wind Tunnel Based on Suction[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(9): 1985-1992.)

1 引言

为了满足先进航空发动机的实际需求,现代轴流式压气机和涡轮向着高效率、高级压比、高负荷的方向不断发展。平面叶栅风洞试验是轴流式叶栅机械设计与发展的重要环节,它能够高效、快速、直观地建立基元速度三角形与叶栅几何参数之间关联关系^[1-2]。通过大量的平面叶栅吹风试验构建完备的叶型基础性能数据库,是发展航空发动机设计体系的重要基础^[3-5]。

平面叶栅风洞必须满足一定的流场品质要求,以保证叶栅试验测量结果的可用性^[6-7]。蔡明等^[8]基于高亚声速平面风洞的试验测量发现,在较大来流攻角下,靠近较短侧可调导流板的三个叶栅通道的进口均匀性以及出口周期性较差,增大了试验测量结果的不确定性。详细的数值模拟研究^[9]发现,影响平面叶栅风洞流场品质和试验有效测量范围的主要原因是:较大攻角下叶栅风洞固有结构导致了靠近可移动上侧壁的叶栅通道内发生较大堵塞,这种风洞侧壁影响在叶片数不够多的情况下会波及到叶栅中间通道,直接影响了试验测量通道的选择及测量可靠性。平面叶栅试验人员也发现,来流均匀性和出口周期性不佳将导致流场测量中出现不必要的 uncertainty^[10-11],削弱了叶栅风洞试验测量结果在叶栅机械设计、损失预估模型建立以及数值方法校核等方面的关键作用。因此,研究叶栅风洞流场品质及其控制策略对于更好地发挥叶栅风洞的功能有重大意义。

基于具体的试验台情况,国内外研究人员在平面叶栅风洞试验中采用边界层抽吸、开槽尾板、优化侧壁轮廓线等方法以提升叶栅风洞的流场品质。Lepicovsky等^[11]在跨声速叶栅风洞中,通过优化进口侧壁轮廓形状以及调节进口侧壁与出口尾板的相对位置,改善了原始构型的流场不均匀现象,获得了较为均匀的进口壁面静压分布。Bo等^[12]对在高亚声速平面叶栅风洞试验中采用了边界层抽吸和尾板相结合的方式,改善了大转折角(55°)压气机叶栅进口壁面静压分布均匀性以及出口损失及出气角周期性;但高来流马赫数下叶栅流场的周期性仍然较差。Rona等^[13-14]在跨声速涡轮平面叶栅试验中,通过安装开槽尾板减弱了涡轮叶栅出口波系反射对出口流场周期性的影响。巩昊等^[15]、陈宇等^[16]研究了不同开孔率和偏转角度的开槽尾板对跨声速涡轮叶栅表面及叶栅流道出口压力分布周期性的影响。杨泳

等^[17]发现不同尾板偏移角度和侧壁通道宽度对平面叶栅进口周期性的影响不同。

可以看出,目前通过可调尾板提升跨声速涡轮平面叶栅出口周期性的研究较多,而针对压气机平面叶栅风洞流场品质的研究较少。借助平面叶栅实验开展的诸多研究仅提到可通过边界层抽吸调节流场周期性和均匀性,但很少有文献对其影响规律及控制效果进行全面细致的研究。因此,基于之前对无调控措施下原始叶栅风洞流场的实验测量和数值模拟研究,本文进一步探究了在风洞试验段上侧壁不同位置开设抽吸槽的方法对平面叶栅风洞进出口流场品质的影响规律,以期为实际风洞吹风试验流场品质的控制和改进提供借鉴。

2 模型建立及抽吸方案设计

2.1 模型建立及数值方法

和文献[8]一致,本文的基础研究对象仍然是典型的开口吹气式风洞,即NPU连续式高亚声速叶栅风洞,其试验段结构如图1所示。试验段进口安装有可移动的上、下侧壁,上、下侧壁平行且和轴向进气方向一致。叶栅试验件安装在可转动圆盘上,通过转动圆盘实现叶栅来流攻角的调节,同时通过调节可移动上、下侧壁使之与叶栅首、末叶片搭接以封闭进口流道。

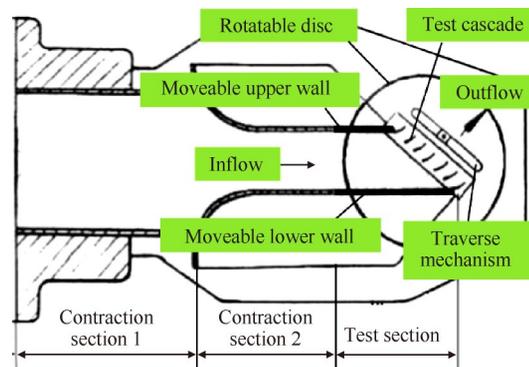


Fig. 1 Schematic diagram of test section of NPU linear cascade wind tunnel

基于图1所示的风洞试验段结构,建立了如图2所示的平面叶栅风洞试验段三维模型。其中,展向一侧的风洞侧壁未显示。风洞试验段模型的建立过程及具体说明在文献[9]中进行了详细介绍。不同的是,基于前期开展的原始叶栅风洞试验测量及计算,本文主要针对流场品质不佳的较大攻角工况进行流场调控,因此图2所示的模型对应于 $i=4^\circ$ 的设定来流攻角。另外,为了更加真实地模拟实际风洞的

全三维情况,本文建立的模型在叶展方向上具有和实际叶片一致的高度($h=100\text{mm}$),为了模拟实际叶栅的端壁,将垂直于叶展方向 x 的两侧风洞壁面设为无滑移固体壁面边界。栅前和栅后流场测量截面 MP_1 和 MP_2 的选择以及计算模型其它边界的设定和文献[8]中一致,分别位于叶栅上游0.5倍弦长和下游1倍弦长,经过网格无关性验证后确定该计算模型的网格数为600万。依照实际需求,本文针对由8个直叶片构成的叶栅试验件进行探究,叶栅的8个叶片从上至下依次记为1#~8#叶片。

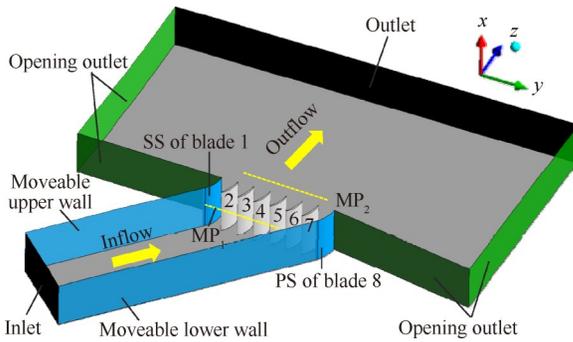


Fig. 2 Computational model of test section in linear cascade wind tunnel

为了验证本文建立风洞试验段模型及数值方法的可靠性,选择前期已开展过实验测量的某亚声速压气机叶型[8]进行验证。如图3所示,在该叶型的设计工况下,即进口马赫数为0.6,进口气流角为 41° ,将进口流场测量结果和采用图2所示计算模型得到的数值计算结果进行比较,结果见图3。由图可知,整体上数值结果和试验测量结果的进口马赫数和进口气流角沿叶栅周向的分布趋势较为一致,表明通过本文建立的风洞试验段三维模型及数值方法对平面叶栅风洞流场进行模拟研究是可行的。

2.2 试验段抽吸方案设计

前期的试验测量[8]及数值模拟[9]研究表明,较大攻角下平面叶栅风洞的固有阻塞效应会导致上侧壁附近的通道发生堵塞,进而影响整个叶栅周向流场品质。因此,提升风洞流场品质的关键是改善靠近可移动上侧壁通道内的堵塞状况。针对侧壁附近的流动分离和阻塞问题,边界层抽吸是一种行之有效的控制方法。因此,本文将采用抽吸的方法对来流马赫数为0.5,来流攻角为 4° 工况下的流场品质进行调节。

基于图2中的原始试验段计算模型设计抽吸方案,如图4所示。参考国外一些风洞的调控措施,在

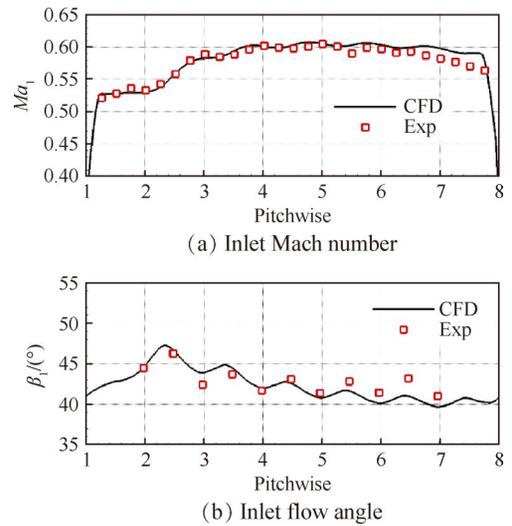


Fig. 3 Compare of pitchwise distribution of inlet flow field between CFD and experiment at design condition

可移动上侧壁和1#叶片之间布置抽吸缝,记为Cavity A方案。该方案的实施不依赖于具体的叶栅试验件,设计灵活、工程应用性较好。原始叶栅风洞的数值研究[9]表明,全叶片结构下靠近可移动上侧壁的1#叶片表面气流分离区覆盖整个叶片中后部,为了吸除所在通道中后部的大量低能流体,在1#叶片叶背后端约70%~80%弦长内开设抽吸缝进行抽吸,记为Cavity B方案。该方案的设计依赖于具体的叶栅试验件,实际应用时不够灵活。

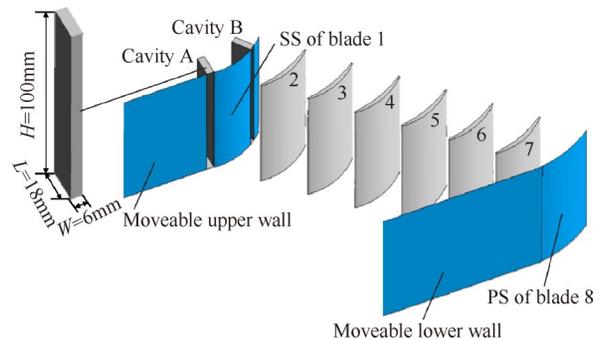


Fig. 4 Suction cavities of two modifications

位于试验段上侧壁的两个抽吸方案如图4所示。抽吸缝覆盖整个叶片高度,缝宽为6mm,为了模拟实际的抽吸系统,将抽吸缝沿着周向延伸3倍缝宽后形成一个矩形抽吸槽道。抽吸槽道的计算网格如图5所示,抽吸槽道和叶栅流道的网格交界面设为非匹配边界,槽道出口设置为抽吸流量边界,槽道的展向两侧以及轴向两侧均为无滑移固体壁面。为了便于分析,以叶栅进口总流量定义抽吸槽道的相对抽吸量 S ,定义为 $S = m_s / m_1 \times 100\%$, m_s 为槽道出口设置的抽吸流量, m_1 为叶栅进口总流量。

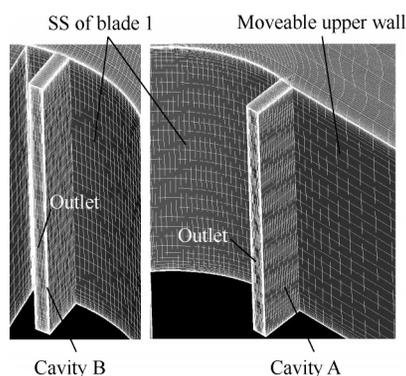


Fig. 5 Grid of suction cavities

3 抽吸控制效果分析

采用图2所示的原始计算模型以及图4所示的两种抽吸方案,对设定进口马赫数为0.5,来流攻角为4°工况下的平面叶栅风洞试验段流场进行模拟和分析。

3.1 进口流场均匀性和准确性分析

为了便于分析,基于叶栅实验的来流马赫数需求以及通过圆盘机构设定的叶栅进气角,定义叶栅进口50%叶高处测点K位置的进口马赫数偏差以及进口气流角偏差如下^[8]

$$\Delta Ma_{1k} = Ma_{1k} - Ma_{1s} \quad (1)$$

$$\Delta \beta_{1k} = \beta_{1k} - \beta_{1s} \quad (2)$$

式中 β_{1s} 表示叶栅和风洞轴向确定的设定进气角,在试验中一般由可转动圆盘读出; β_{1k} 表示栅前测量截面中径处测得实际进气角; Ma_{1s} 表示叶栅试验需要模拟的来流马赫数, Ma_{1k} 表示栅前测量截面中径处测得实际来流马赫数。进口马赫数和进口气流角的偏差值越接近于0,表明来流工况的准确性越好,即叶栅实际来流攻角和来流马赫数越接近试验工况要求的设定值。

图6所示为无抽吸以及Cavity A, Cavity B两个抽吸位置在相同抽吸量 $S=0.43\%$ 下对进口流场的控制效果对比。图中横轴表示1#~8#叶片,将1#叶片和2#叶片构成的通道记为 P_1 ,2#叶片和3#叶片构成的通道记为 P_2 ,以此类推。

由图6可知,无抽吸时的原始叶栅风洞进口流场分布和图3所示的试验测量结果的分布趋势特征一致,进口流场的不均匀区域基本覆盖了靠近可移动上侧壁 $P_1\sim P_3$ 三个叶栅通道,3#叶片和4#叶片之间的来流马赫数周向分布的斜率最大,表明该位置栅前静压周向分布的不均匀性最强,对应于进口马赫数分布不均匀性最强的位置,来流攻角偏离设定值的

程度达到最大,高出设定值约3°。总体上看,只有 P_6 通道的来流均匀性较好,进口马赫数偏差 <0.005 ,进气角偏差 $<0.3^\circ$ 。结合已有研究发现,原始叶栅风洞靠近上侧壁的这种局部不均匀性沿着周向传递,对其它叶栅通道的流动产生干扰和影响,最终导致叶栅进口以及出口流场的有效测量范围缩小,无法满足试验要求。

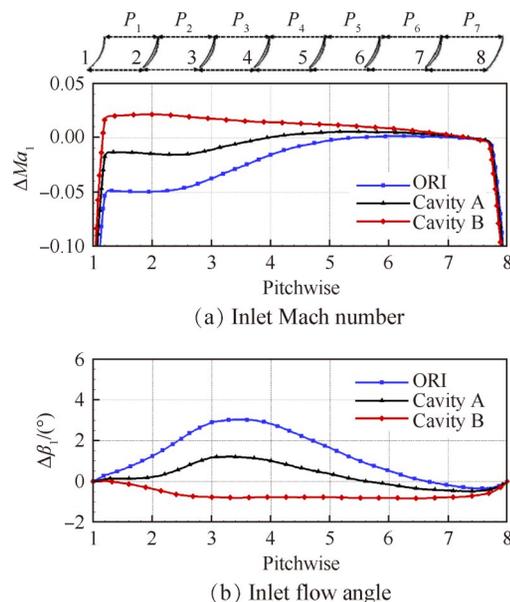


Fig. 6 Inflow distribution comparison between different suction positions with suction flow rate of 0.43%

通过在试验段上侧壁进行抽吸能够有效提升原始叶栅流场品质。由图6可以看出,在Cavity A, Cavity B两个位置,抽吸均能明显改善叶栅进口流场的均匀性和准确性。抽吸后,靠近可移动上侧壁的 $P_1\sim P_4$ 四个通道的进口马赫数以及进气角的周向分布均匀性显著提升,进口马赫数增大,进口气流角减小,叶栅实际来流工况和设定值的差异明显减小。

在 $S=0.43\%$ 抽吸流量下,和来流工况的设定值相比,Cavity B抽吸量过大,导致抽吸后 $P_1\sim P_3$ 通道的进口马赫数超过设定值达0.02,进气角低于设定值近1°;Cavity A抽吸量偏小,导致抽吸后 $P_1\sim P_3$ 通道的进口马赫数仍低于设定值达0.015,进气角仍高于设定值近1°。若以理想的进口均匀性和准确性为目标,对于两个抽吸位置Cavity A和Cavity B, $S=0.43\%$ 抽吸流量均不是最佳选择,可以通过调节抽吸流量的大小进一步提升来流品质。

图7为Cavity A抽吸方案在不同抽吸流量下叶栅进口马赫数和进口气流角分布。由图7可知,在Cavity A进行抽吸时,随着抽吸量逐渐增大,叶栅进口流

场的均匀性和准确性逐渐提升,当抽吸流量达到0.87%时,叶栅进口马赫数和进气角的均匀性和准确性最好,除了靠近侧壁处,几乎所有通道的进口马赫数与其设定值的差值<0.005;进气角与其设定值之间相差不到0.5°。当抽吸流量继续增大至1.15%时, $P_1\sim P_2$ 两个通道的进口流场参数和设定值之间的差异反而开始增大,表明此时已经出现过抽吸。

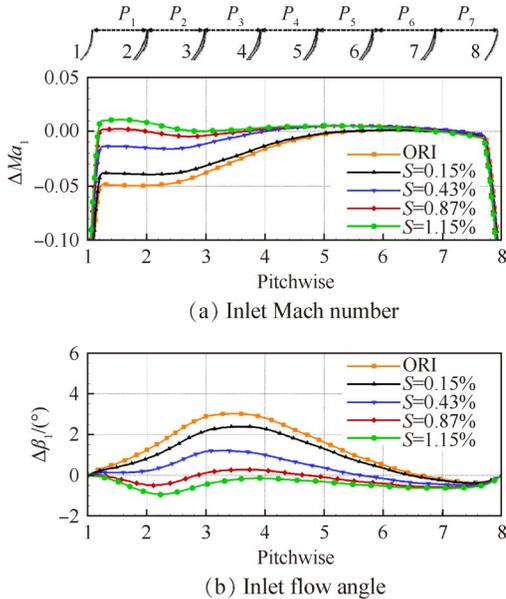


Fig. 7 Variation of inflow distribution with suction flow rate of cavity A

图8为Cavity B抽吸方案在不同抽吸流量下叶栅进口马赫数和进口气流角分布。由图8可知,当抽吸量从0增大至0.15%时,叶栅进口流场参数分布比无抽吸时变化很小,当抽吸量增至0.28%时,叶栅进口流场品质突然提升, $P_1\sim P_4$ 四个通道的进口马赫数和进口气流角沿周向基本呈现平直的均匀性分布,进口马赫数高出设定值约0.01,进气角和设定值之间的差值<0.5°。继续增大抽吸流量时将出现过抽吸,此时进口均匀性和准确性开始下降。

图9给出了无抽吸(ORI)和两种抽吸条件(Cavity A, $S=0.87%$; Cavity B, $S=0.28%$)下叶栅进出口中叶展位置的马赫数云图,实线表示气流实际流向,虚线表示平行于风洞轴线的理论流向。由图9(a)可知,无抽吸时,受上端叶栅通道的堵塞影响,栅前流通面积发生改变,沿着风洞轴线流入的气流逐渐向下偏移,叶片实际来流攻角偏大。由图9(b)和图9(c)可知,两种方案抽吸后栅前静压沿周向分布逐渐均匀, $P_1\sim P_3$ 三个通道进口静压降低,来流气流角向下侧壁偏移程度明显减小,实际来流方向和风洞轴线基本

一致。

以上分析表明通过调节抽吸流量两种抽吸方案均可以实现接近理想的来流品质,此时Cavity A消耗

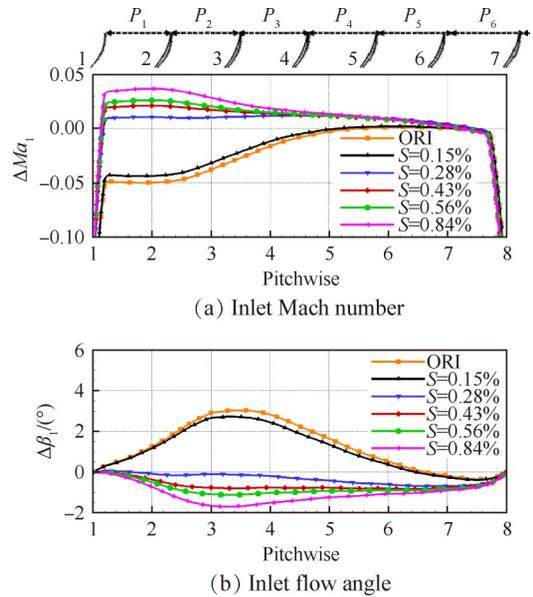


Fig. 8 Variation of inflow distribution with suction flow rate of cavity B

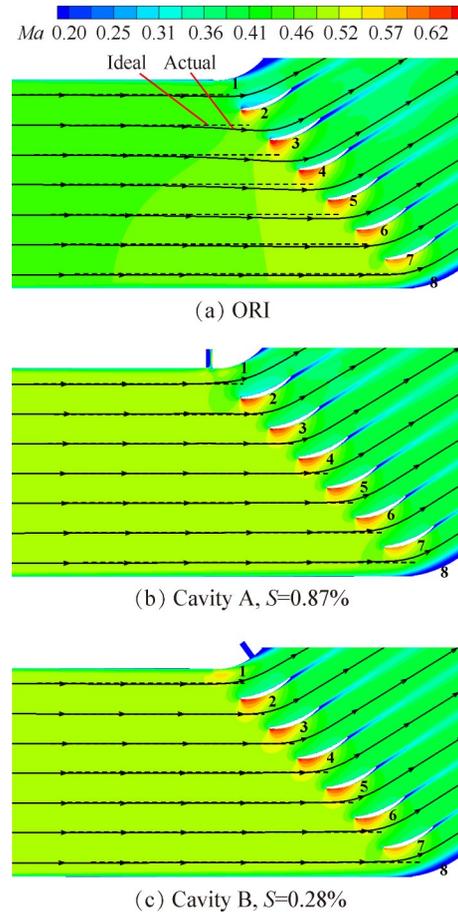


Fig. 9 Mach number contours and streamlines at midspan

的抽吸流量($S=0.87\%$)约为 Cavity B($S=0.28\%$)的3倍。这是因为栅前气流静压比通道内堵塞区内低能流体的静压更高,因此在位于栅前的 Cavity A 位置进行抽吸需要消耗的抽吸量更大;而在能够直接作用于通道内低能流体的 Cavity B 位置进行抽吸需要消耗的抽吸量则较少。

3.2 出口流场周期性分析

叶栅出口流场的周期性决定了叶栅出口尾迹和出气角测量的可靠性。因此在保证来流均匀性和准确性的同时,还需要保证叶栅出口流场的周期性。

图 10 和图 11 分别给出了两种抽吸方案下叶栅出口马赫数和出气角分布随抽吸流量的变化。无抽吸时,受栅前流场不均匀性的影响,叶栅出口流场的周期性较差。随着抽吸量增大,Cavity A 抽吸对叶栅出口周期性的提升较小,仅 P_1 通道的出口流场有所改善,其它通道出口流场参数变化很小;而 Cavity B 抽吸后叶栅出口周期性明显提升,当抽吸流量达到 0.28% 以后, $P_1\sim P_4$ 四个通道的出口马赫数和出气角分布表现出较好的周期性,出口马赫数分布的变化相对较小,但出气角分布的周期性发生明显改善。

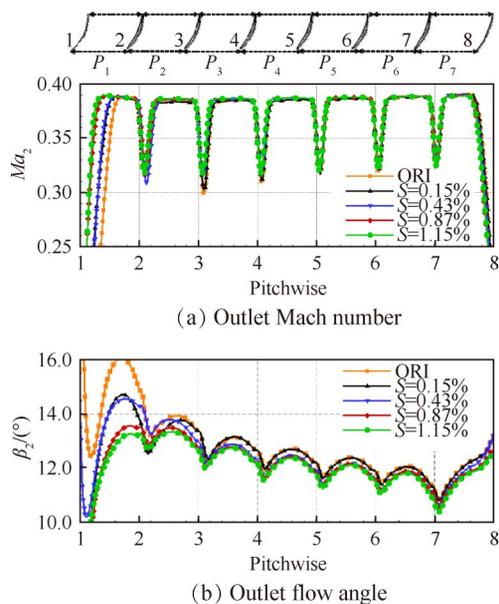


Fig. 10 Variation of outflow distribution with suction flow rate of cavity A

中叶展的出口流场分布表明,在1#叶片吸力面中后部进行抽吸的 Cavity B 方案能够同时提升进口均匀性和出口周期性,而位于可移动上侧壁和1#叶片之间的 Cavity B 抽吸方案对出口周期性的提升较小。

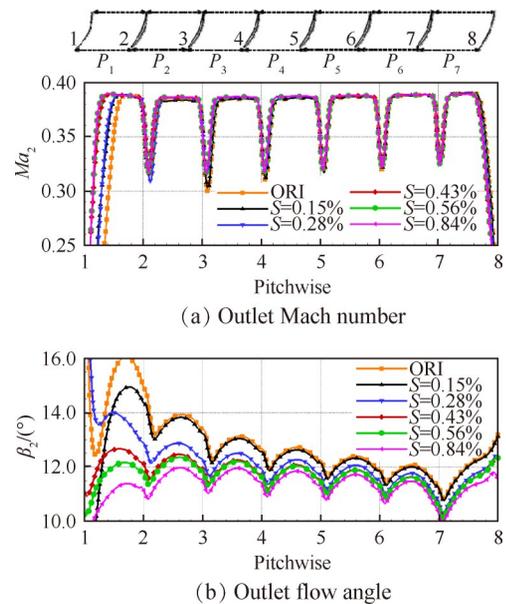


Fig. 11 Variation of outflow distribution with suction flow rate of cavity B

3.3 抽吸控制效果总体分析

图 12 所示为无抽吸和两种抽吸条件下1#叶片~7#叶片的吸力面表面极限流线分布,图 13 所示为无抽吸和两种抽吸条件下各叶栅通道的相对流量分布。由图 12 可知,相比于无抽吸,两种抽吸方案均能改善1#叶片表面的流动分离,Cavity B 抽吸后1#叶片表面的角区分离区域比 Cavity A 更小,这是因为 Cavity B 抽吸位置更加靠近叶栅通道的堵塞区域,能够大范围地吸除 P_1 通道内的低能流体,更大程度地减弱叶栅固有结构造成的通道阻塞。由图 13 可知,无抽吸时,流入 $P_1\sim P_2$ 两个通道的流量明显小于其它通道,此时通道内发生较大堵塞。两种方案抽吸后流过 $P_1\sim P_3$ 三个通道的流量明显提升。Cavity A 抽吸后 $P_1\sim P_2$ 通道仍然存在一定的堵塞,而 Cavity B 抽吸后 $P_1\sim P_3$ 三个通道和其它通道的流量基本一致,表明此时平面叶栅流场各通道的流通性最好,堵塞最小,因此叶栅风洞进出口流场品质显著提升。

总体上看,依赖于具体叶栅的1#叶片中后部抽吸方案 Cavity B 能够在消耗较小抽吸量的条件下有效提升叶栅进口均匀性和出口周期性,虽然工程应用性稍差,但针对具体平面叶栅实验件流场品质的控制仍然具有较大的参考价值,但在1#叶片中后部不同位置进行抽吸的差异需要作进一步的精细探究。相比之下,在风洞试验段可移动上侧壁和叶栅1#叶片之间的抽吸方案 Cavity A 能够较好地实现任意叶栅试验件的来流品质控制,但对出口周期

性的改善作用有限,而且需要消耗更大的抽吸能力。

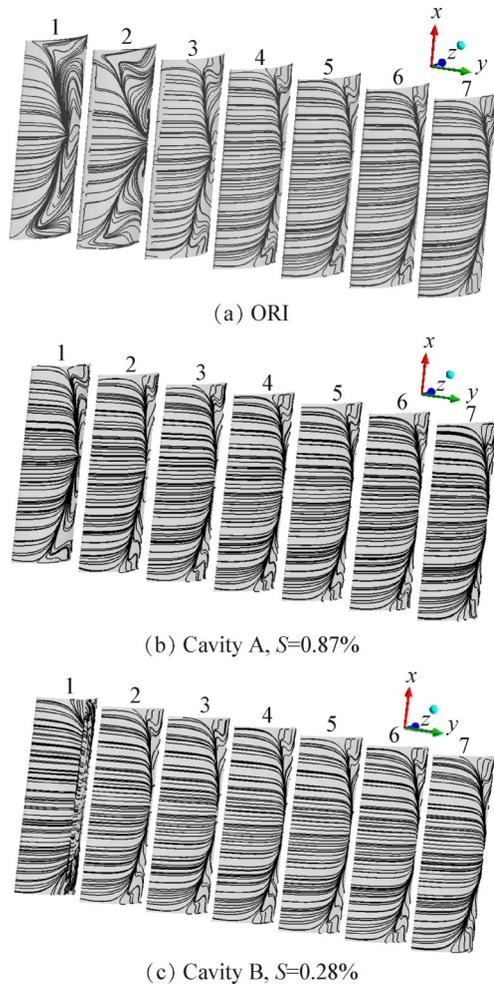


Fig. 12 Flow visualizations of the blade suction side in cascade

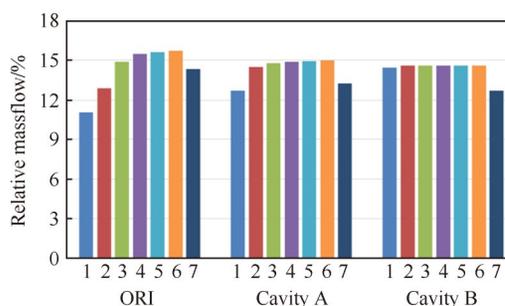


Fig. 13 Relative massflow of each blade passage

4 结论

本文主要研究了较大攻角下两种风洞侧壁抽吸方案对平面叶栅进出口流场品质的控制效果。主要得出如下结论:

(1) 靠近风洞上侧壁的两抽吸方案均能有效

改善大攻角来流条件下叶栅通道内的流动堵塞,提升整个平面叶栅流场的流通性,使超过三个连续通道的进口流场基本均匀,进口马赫数和设定值的偏差 <0.01 ;进气角和设定值的偏差 $<0.5^\circ$ 。

(2) 试验段上侧壁抽吸流量存在一个临界值,低于临界流量时,叶栅来流品质随抽吸量的增大而提升;超过临界流量时,来流品质开始下降;不同抽吸位置的临界流量也不相同,Cavity A抽吸方案的临界流量约为Cavity B的3倍。

(3) 不同抽吸位置对叶栅风洞流场品质的控制效果也不相同。位于可移动上侧壁和首叶片之间的Cavity A抽吸对进口均匀性提升较大,但对出口周期性提升较小;位于首叶片吸力面中后部的Cavity B抽吸能够同时提升进口均匀性和出口周期性。

针对本文的研究结论,后续工作将基于具体叶栅风洞实验台通过试验探究不同抽吸方案对叶栅风洞流场品质的控制效果。

致谢:感谢国家科技重大专项、引智计划及国家自然科学基金重点项目的资助,感谢曹志远老师对论文研究的建议和帮助。

参考文献

- [1] Dunavant J C, Emery J C, Walch H C, et al. High-Speed Cascade Tests of the NACA 65-(12A₁₀) 10 and NACA 65-(12A_{2I_{8b}}) 10 Compressor Blade Sections [R]. NASA RM-L55108, 1955.
- [2] Emery J C, Dunavant J C. Two-Dimensional Cascade Tests of NACA 65-(C₁₀A₁₀) 10 Blade Sections at Typical Compressor Hub Conditions for Speeds up to Choking [R]. NASA RM-L57H05, 1957.
- [3] 楚武利, 刘前智, 胡春波. 航空叶片机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2009.
- [4] 胡 骏. 航空叶片机原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2014.
- [5] 魏 巍, 刘 波, 杜 炜, 等. 可控扩散叶型与双圆弧叶型试验对比研究[J]. 推进技术, 2017, 38(1): 61-68. (WEI Wei, LIU Bo, DU Wei, et al. Experimental Comparison of Controlled Diffusion Airfoils with Double Circle Airfoils[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(1): 61-68.)
- [6] HB20145-2014, 超跨声速平面叶栅试验方法[S].
- [7] 刘前智, 严汝群. 轴向密流比对叶栅性能影响的研究[J]. 西北工业大学学报, 1989, 7(2): 129-137.
- [8] 蔡 明, 高丽敏, 刘 哲, 等. 不同条件下平面叶栅风洞流场品质的实验研究[J]. 推进技术, 2021, 42(5): 1162-1170. (CAI Ming, GAO Li-min, LIU Zhe, et al. Experimental Study on Flow Quality of Linear Cas-

- cade Wind Tunnel under Different Conditions [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(5):1162-1170.)
- [9] 蔡 明, 高丽敏, 刘 哲, 等. 高负荷扩压叶栅进口均匀性改进及分析[C]. 北京:中国工程热物理学会热机气动热力学和流体机械学术会议, 2019.
- [10] Rona A, Gostelow J P. Performance Margins of Non-Reflecting Slotted Walls in a Transonic Linear Cascade Tunnel[R]. *ASME 2006-GT-91057*.
- [11] Lepicovsky J, Mcfarland E R, Chima R V. On Flowfield Periodicity in the NASA Transonic Flutter Cascade, Part I: Experimental Study[R]. *ASME 2000-GT-0572*.
- [12] Bo S, Gui X, Li S, et al. Flow Periodicity Improvement in a High Speed Compressor Cascade with a Large Turning-Angle[R]. *AIAA 2002-3539*.
- [13] Rona A, Gostelow J P. Performance of Slotted End Wall Linear Cascade Tunnels at Off-Design Conditions [R]. *AIAA 2005-908*.
- [14] Rona A, Gostelow J P, Paciorri R, et al. Wall Interference in the Discharge Flow in a Linear Cascade Wind Tunnel[R]. *AIAA 2003-455*.
- [15] 巩 昊, 徐惊雷, 陈 宇. 开槽尾流板对跨声速涡轮平面叶栅流场影响的试验[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(12): 3048-3056.
- [16] 陈 宇, 徐惊雷, 黄 帅, 等. 平面叶栅尾流板开孔率对跨声速涡轮叶栅流道影响的数值分析[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(1): 209-214.
- [17] 杨 泳, 徐开俊, 李珊珊, 等. 平面叶栅周期性特性数值研究[J]. *液压与气动*, 2018(9): 92-97.

(编辑:史亚红)