

变攻角下端壁非定常脉动抽吸对高负荷 压气机叶栅性能的影响^{*}

张洪鑫, 陈绍文, 李伟航, 王松涛, 王仲奇

(哈尔滨工业大学 发动机气体动力研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为进一步探究非定常脉动抽吸控制高负荷压气机叶栅流动分离的机理, 考察非定常脉动抽吸在变攻角下的适应性和可行性, 采用非定常数值方法, 系统研究了变攻角下, 非定常脉动抽吸对流场性能的影响, 并将其与传统的定常抽吸进行了比较分析。结果表明, 在设计攻角下, 保证相同的时均抽吸量, 非定常脉动抽吸控制效果明显优于定常抽吸; 在时均抽吸量 $m_s=0.4\%$ 时, 在给定的激励频率范围内, 非定常脉动抽吸都展现出更好的性能, 在最优频率时, 损失减小了9.4%, 静压升提高了12.9%, 相比于定常抽吸损失减小了4.2%, 静压升提高了4.7%。在变攻角下, 在给定的激励频率范围内, 非定常脉动抽吸控制效果相比于定常抽吸仍具有较大优势; 但大攻角下, 非定常脉动抽吸和定常抽吸控制效果均有所下降。

关键词: 非定常脉动抽吸; 高负荷压气机; 时均抽吸率; 流动分离; 攻角

中图分类号: V231

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2019) 10-2206-10

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 180449

Effects of Endwall Unsteady Pulsed Suction on a Highly Loaded Compressor Cascade under Different Incidence Angles

ZHANG Hong-xin, CHEN Shao-wen, LI Wei-hang, WANG Song-tao, WANG Zhong-qi

(Engine Aerodynamics Research Centre, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to further explore the mechanism of unsteady pulsed suction (UPS) to control flow separations in a highly loaded compressor cascade and investigate the adaptability and flexibility of UPS under different incidence angles, the effects of UPS on flow field performances under different incidence angles are studied systemically by numerical simulation, and the comparative analysis between UPS and conventional steady constant suction (SCS) is carried out. The results show that the control effect of flow separations for UPS under the designed incidence angle is obviously better than that for SCS with the same time-averaged suction flow rate. UPS shows better performances in a given range of excitation frequency with the time-averaged suction flow rate $m_s=0.4\%$, based on the optimum excitation frequency for UPS, the loss is reduced by 9.4% and the static pressure rise coefficient increased by 12.9%, and compared to SCS, the loss is reduced by 4.2% and the static pressure rise coefficient increased by 4.7%. UPS has still a greater advantage compared to SCS in a given range of excita-

^{*} 收稿日期: 2018-07-18; 修订日期: 2018-10-22。

基金项目: 国家自然科学基金 (51776048; 51436002)。

作者简介: 张洪鑫, 博士生, 研究领域为叶轮机械流动机理及控制。E-mail: zhanghongxin0404@163.com

通讯作者: 陈绍文, 博士, 副教授, 研究领域为叶轮机械流动机理及控制。E-mail: cswemail@hit.edu.cn

引用格式: 张洪鑫, 陈绍文, 李伟航, 等. 变攻角下端壁非定常脉动抽吸对高负荷压气机叶栅性能的影响[J]. 推进技术, 2019, 40(10):2206-2215. (ZHANG Hong-xin, CHEN Shao-wen, LI Wei-hang, et al. Effects of Endwall Unsteady Pulsed Suction on a Highly Loaded Compressor Cascade under Different Incidence Angles [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(10):2206-2215.)

tion frequency under different incidence angles, however, the control effects of UPS and SCS are decreased under a large incidence angle.

Key words: Unsteady pulsed suction; Highly loaded compressor; Time-averaged suction flow rate; Flow separation; Incidence angle

1 引言

压气机的高负荷设计对现代先进航空发动机整机性能的提升是至关重要的。压气机负荷的增加主要通过增加叶尖速度和提高气流折转能力来实现。当叶尖速度的不断增加受到阻碍时,提高气流折转能力将成为进一步增加压气机性能的主要手段。然而这也随之导致压气机内部出现强的逆压梯度,造成流动分离加剧。而严重的流动分离会造成流道堵塞和效率下降,甚至出现失速和喘振。为解决上述等问题,流动控制方法作为一种有效地控制流动分离的方法被引入到压气机中,以提升其性能^[1-3]。

近些年,一些研究发现,非定常流动控制方法具有极大的应用潜能,已展现出比传统的定常流动控制方法更有效地控制流动分离,减小损失和提升压比的性能^[1-3]。Hecklau等^[4-5]针对高负荷压气机叶栅,通过实验方式详细研究了脉动射流和定常射流分别对角区分离的控制效果,结果表明,保证射流系数相同的情况下,脉动射流控制效果比定常射流更显著,最优情况下,压比提升是定常射流的1.6倍。随后,De Giorgi等^[6]以Hecklau实验研究的高负荷压气机叶栅为研究对象,采用大涡模拟数值方法评定了合成射流和定常射流对其内部流场的影响,研究发现,在几乎相同的射流系数时,合成射流减小损失是定常射流的2倍。Gmelin等^[7]又采用实验方法来对比验证定常射流和合成射流对此叶栅气动性能的影响,实验结果显示,合成射流抑制角区分离效果明显优于定常射流。同时,国内外研究学者在研究非定常流动控制方法中也发现,激励频率和激励幅值是影响控制效果的关键参数^[8-10]。李龙婷等^[11]在脉动射流控制高负荷压气机叶栅流动分离中发现,随着激励频率和激励幅值的增加,控制效果越显著。Braunscheidel等^[12]针对低速压气机叶栅,采用合成射流来抑制流动分离,研究指出,只有激励参数在合适的范围内,才能够有效地改善气动性能、减小损失。

同时,传统定常抽吸作为一种有效的流动控制流动分离的方法^[13-17],也被国内外学者应用到压气机中,大量的数值和实验研究证实了其在提升压气机性能的显著效果。然而,在以往研究中,为了保证抽

吸的控制效果,通常需要提供较大的抽吸量(约进口流量的3%~7.5%)^[15-17],这势必会造成更多的抽吸功耗,不利于控制对象整体性能的提升;此外,在叶片表面开槽^[16-17]或者开多孔^[18]也将给压气机叶片的强度和寿命带来更大挑战。因此,本文本着利用相对较小抽吸量下以达到较好控制效果的想法,基于非定常流动控制方法在控制流动分离方面已展现出的优势,提出了一种基于传统定常抽吸方法的非定常流动控制方法——非定常脉动抽吸,仅仅通过上、下端壁对称安装的两个引气孔,来尝试尽可能地改善高负荷压气机的气动性能。

到目前为止,已公开发表的文献中关于非定常脉动抽吸的研究仍较少,对非定常脉动抽吸在变工况条件下控制效果缺乏深入的认识。为此,本文以高负荷压气机叶栅为研究对象,采用非定常数值方法,探究在变攻角下非定常脉动抽吸控制流动分离的物理机制,进一步掌握非定常脉动抽吸在变攻角下的适应性和可行性,并将与定常抽吸控制效果进行对比分析,以考察非定常脉动抽吸改善气动性能的优劣性。

2 研究对象及数值方法

2.1 研究对象

当前研究采用的叶型是通过NACA65-24A₁₀-10改型而来,且叶片的几何折转角为60°,其余具体的气动参数可参见表1。如图1为本文中使用的压气机叶栅的模型示意图,文中所使用的引气孔对称位于叶片前缘50%轴向弦长且距离叶片吸力面10%节距的上下端壁上。引气孔的长度与直径,其值分别为20mm与5mm。此外,引气孔与端壁有一定的夹角,本文中,将引气孔方向与端壁的夹角定义为前向倾角 α ,将引气孔在端壁的投影与周向正方向(图1中Y轴正方向)的夹角定义为侧向倾角 β ,且在本文的研究中,前向倾角 α 和侧向倾角 β 分别采用20°和0°。图1中未对侧向倾角进行显示(侧向倾角为0°)。

2.2 数值方法与验证

数值计算是采用商业计算软件ANSYS CFX进行的,此模块基于有限体积法对计算域进行离散,通过求解雷诺平均纳维-斯托克斯(URANS)方程,得到计

Table 1 Geometry parameters for cascade

Parameters	Value
Chord b/mm	100
Stagger angle $\gamma/(\circ)$	18.4
Camber angle $\Delta\theta/(\circ)$	60
Inflow angle $\theta_i/(\circ)$	48.185
Solidity b/e	1.25
Aspect ratio h/b	1

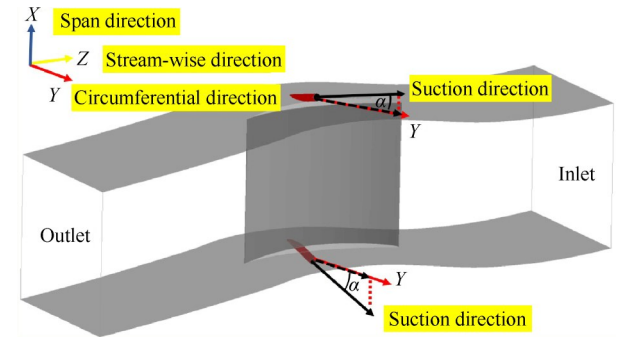


Fig. 1 Schematic diagram of the blade profile and bleed holes

算域的相关参数。计算过程中,湍流模型采用 $k-\omega$ SST 湍流模型。此模型能够满足准确预测流动分离的要求^[18-19],并且已经被大量应用于压气机叶栅中^[6,8-9]。对流项的离散采用高精度差分格式,时间项的离散采用二阶向后欧拉格式。时间步长为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}$,每个时间步长内的最大迭代步数是 10。通过将定常计算结果作为非定常计算的初场来加速收敛过程。当处于尾缘附近的监测点参数呈现周期性或准周期状态时,认为获取收敛解,并开始记录数据。如图 2 所示, O4H 型结构化网格被构建,并对叶片表面和端壁进行网格加密来确保较好地捕捉到流动细节,叶片表面和端壁 y^+ 小于 1 来符合湍流模型的要求。

鉴于非定常脉动抽吸是本文研究的重点内容,基于此控制方法下的网格无关性验证被实施。图 3

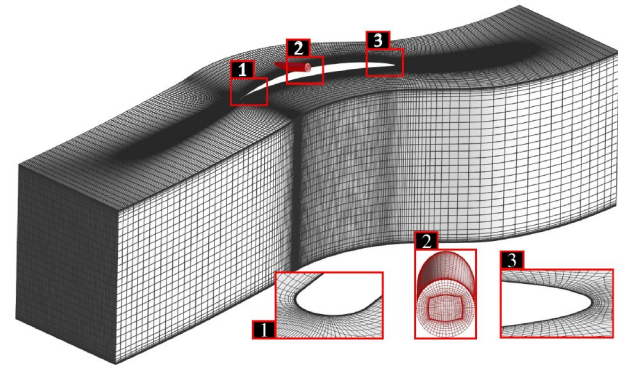


Fig. 2 Mesh for the cascade and bleed hole

给出了 0° 攻角下时均总压损失系数随网格数量的变化情况,由图可知,当网格数增加至约 132 万时,继续增加网格数量,时均总压损失系数变化并不明显,在 132 万与 244 万网格数下,总压损失变化率仅约 0.15%,因此,在保证计算精度的前提下,为了进一步节约计算资源,网格数定为约 132 万。

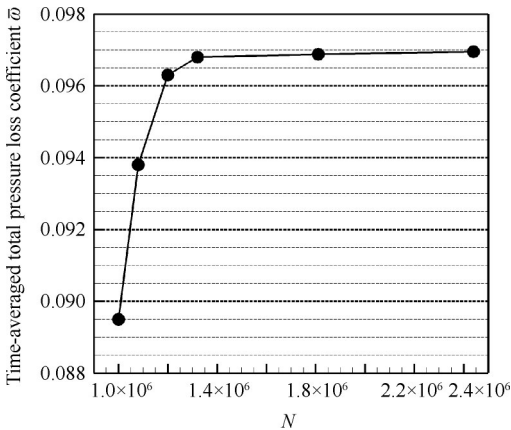


Fig.3 Total pressure loss coefficient at different mesh numbers

进口马赫数是 0.23,并通过给定总压、总温、进口速度方向和湍流强度来设定计算域入口边界条件,出口边界给定背压。引气孔给定非定常速度边界来实现非定脉动抽吸,其表达式为

$$U_{\text{suction}}(t) = |U_m \sin(\pi f t)| \quad (1)$$

式中 U_m 为一个周期内最大抽吸速度, f 为激励频率, t 为时间。

总压损失系数用来评估气动性能的改善效果,考虑抽吸质量和湍动能的影响,有抽吸和无抽吸情况下的总压损失系数表达式如下所示

$$\varpi(t)_{\text{with suction}} = \frac{(m_{\text{in}} - m_{\text{suction}})(p_{\text{in}}^* - p_{\text{out}}^*) + m_{\text{suction}}(p_{\text{in}}^* - p_{\text{suction}}^*)}{m_{\text{in}}(p_{\text{in}}^* - p_{\text{in}})} \quad (2)$$

$$\varpi(t)_{\text{without suction}} = \frac{p_{\text{in}}^* - p_{\text{out}}^*}{p_{\text{in}}^* - p_{\text{in}}} \quad (3)$$

一个周期内时均总压损失系数为

$$\varpi = \frac{\int_{t_1}^{t_2} m_{\text{in}}(t) \varpi(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} m_{\text{in}}(t) dt} \quad (4)$$

静压升系数为

$$C_p(t) = \frac{p - p_{\text{in}}}{p_{\text{in}}^* - p_{\text{in}}} \quad (5)$$

一个周期内时均抽吸率为

$$m_s = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \frac{m_{\text{suction}}}{m_{\text{in}}} dt}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

式中 m 为质量流量, p, p^* 分别为静压和总压。角标“in”, “out”和“suction”分别表示计算域的进口、出口和引气孔的出口。

Q 准则^[20]为

$$Q = \frac{1}{2} (\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad (7)$$

式中 Ω 和 S 分别表示旋转角速度张量和变形率张量, 当 $Q > 0$ 时表示流体区域中旋转运动占主要地位。

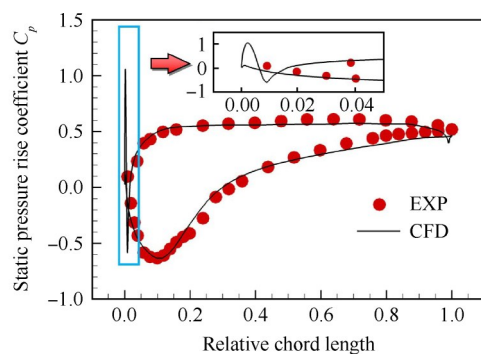
通过数值结果与试验测试数据的对比来验证本文数值结果的准确性与可信度。在当前研究中选取了与本文类似的 60° 折转角压气机叶栅的实验结果进行验证。图4给出了数值结果与实验结果^[4]的对比。由图4(a)50%叶高处叶型表面静压系数分布可知, 数值结果能够很好地描述实验结果的分布规律和趋势, 并且数值结果与实验结果基本保持一致。图4(b)为距尾缘 $1/3$ 轴向弦长处的总压损失系数云图和速度矢量图, 由图可知, 尽管在角区中心处数值结果略小于实验结果, 但数值结果对高损失区范围和位置与实验结果能够基本吻合。以上对比表明, 本文所采用的数值方法是可行的, 能够保证本文数值研究的准确性。

3 结果分析与讨论

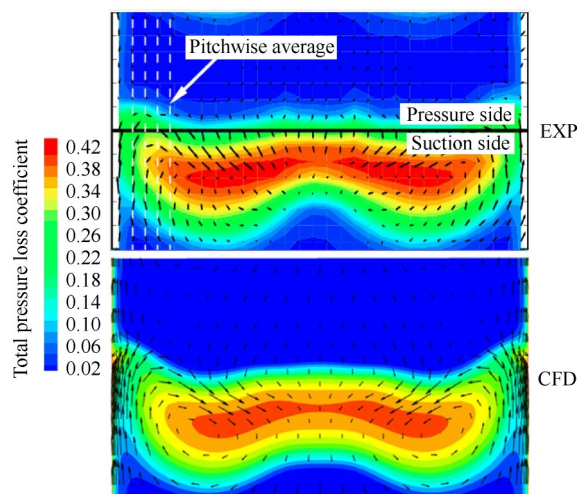
3.1 设计攻角下叶栅气动性能

通过对已有的脉动射流和合成射流等非定常流动控制方法的研究中发现, 这些非定常流动控制方法在控制流动分离方面相比于对应的定常射流具有较大优势^[1-7]。定常抽吸作为一种有效的定常流动控制方法已经被成功地运用于压气机中, 达到了提升压气机气动性能的效果^[13-17]。然而, 本文这种非定常流动控制方法——非定常脉动抽吸是否能够实现比对应的定常抽吸, 更好地控制流动分离, 则需要进一步详细的研究。

图5所示为在设计攻角 ($i=0^\circ$) 时, 不同时均抽吸量下, 定常抽吸和激励频率 $f=354\text{Hz}$ 时非定常脉动抽吸分别对时均总压损失系数的影响。在本文中“Un-excited”代表无抽吸作用下原型流场方案, “SCS”和“UPS”分别代表定常抽吸和非定常脉动抽吸作用下所对应方案。由图可知, 随着时均抽吸量的逐渐增加, 定常抽吸和非定常脉动抽吸减少总压损失越明



(a) Distribution of static pressure coefficient at midspan



(a) Contours of total pressure loss coefficient and velocity vectors at $1/3$ of chord length after trailing edge

Fig. 4 Comparison between numerical and experimental results^[4] in a highly loaded compressor cascade

显。值得注意的是, 在相同的时均抽吸量下, 非定常脉动抽吸减少总压损失明显优于定常抽吸, 这表明在控制流动分离、改善流场性能方面, 非定常脉动抽吸具有更大的优势。特别是在时均抽吸量 $m_s=0.29\%$ 时, 对于定常抽吸, 此时并不能有效地控制流动分离, 甚至由于抽吸所带来的附加粘性耗散导致损失的增加; 而对于非定常脉动抽吸, 此时总压损失仍减小了 4.3% , 相比于定常抽吸, 总压损失减小了 11.6% , 这表明非定常脉动抽吸在相对更小的抽吸量下就能实现改善流场气动性能的效果, 这也将有利于避免因抽吸量过大造成能量损失过多的问题。同时, 根据文献[21]实验研究所得结论, 能够计算得出直径 5mm 的引气管最大通过流量可以达到本文所研究方案进口流量的 1.48% , 满足本文研究的非定常脉动抽吸的极值流量, 因此本文研究方案所对应的抽吸流量在实际应用中被认为是可行的。

在非定常流动控制方法中激励频率是影响控制效果的关键参数。因此本文接下来详细研究了非定

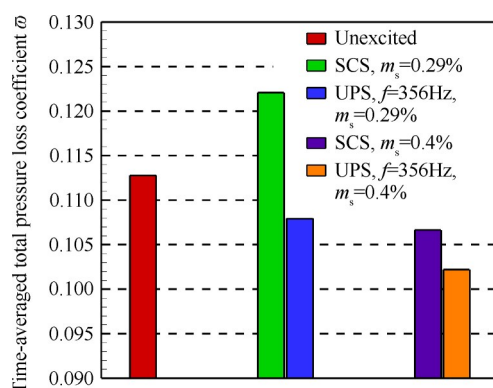


Fig. 5 Time-averaged total pressure loss coefficient for SCS and UPS under different time-averaged suction flow ratio ($i=0^\circ$)

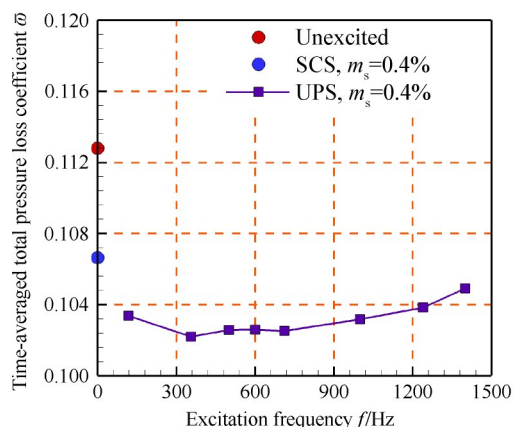
常脉动抽吸在设计攻角下不同激励频率时的控制效果,其中选取时均抽吸量 $m_s=0.4\%$,并仍将其与定常抽吸进行比较。从图6可以发现,在给定的激励频率范围内,非定常脉动抽吸均已表现出较好的性能,相比于定常抽吸,非定常脉动抽吸在此频率范围内控制效果都显示出一定优势。当激励频率 $f=354\text{Hz}$ 时,控制效果最佳,总压损失减小了9.4%,静压升提高了12.9%,相比于定常抽吸,总压损失减小了4.2%,静压升提高了4.7%。

流场的时空结构变化与控制流动分离的效果是密切相关的。图7展示了一个周期内95%叶高处涡量分布云图,从中能够进一步掌握定常抽吸和非定常脉动抽吸对流场产生的影响。由图可知,原型流场中存在着严重的流动分离,在整个周期内吸力面都存在着较强的大尺度分离涡,结合图8能够发现,涡量越大的区域正对应着高损失区,这是因为涡量大的区域内流体微团之间存在着强的剪切力和粘性力,从而引起损失的增加。而在定常抽吸和非定脉

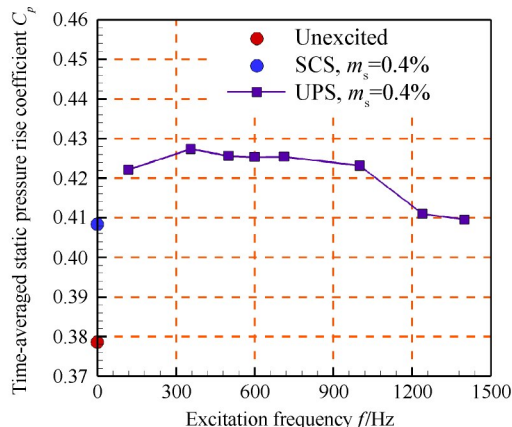
动抽吸激励的作用下,流动分离被有效地抑制,尤其是在非定常脉动抽吸的作用下,吸力面分离涡的尺度减小更为明显,致使以相对较小的涡形式向下游周期性脱落。

在上述分析的基础上,为了对复杂的流场有更清晰的认识,本文使用 Q 准则等值面显示出流道内的三维旋涡结构,如图8所示,并在图中也显示了不同轴向弦长处的时均总压系数云图和相应的回流区。由图可知,对于原型流场中的流动分离呈现出三维性,上下端部的两个分离涡混合交汇形成一个大尺度非对称的分离结构,导致流场出现严重的堵塞,并形成明显的高损失区。在定常抽吸和非定常脉动抽吸的作用下,分离涡得到不同程度地遏制,总压损失被减小,气动性能得到改善;相比于定常抽吸,非定常脉动抽吸的控制效果更为显著。上述结果可以理解为,定常抽吸和非定常脉动抽吸作用下,附面层内低能流体被吸除,使得流场能够克服更强的逆压梯度,因此流动分离被减小;同时,在此基础上,对于非定常脉动抽吸,由于还存在着非定常激励的作用,这会促进附面层内低能流体与主流之间进行能量交换,使得附面层内流体获取一部分能量,这也有利于流动分离的进一步较小。通过 Q 准则等值面显示的旋涡结构能够发现,在定常抽吸和非定常脉动抽吸作用下,流场中分离结构从原型的非对称结构转化成对称结构。这种由于流场中的流动分离得到有效抑制而使得流场结构发生变化的现象,也出现在 Nerger D 等^[22]的压气机叶栅实验研究以及在 Xu^[23]和 Zhang 等^[24]的压气机叶栅数值研究中。

此外,从图8中也可以发现,相比于原型流场,定常抽吸和非定常脉动抽吸下端壁附近存在一些附加的旋涡结构,非定常脉动抽吸较为明显,然而通过时



(a) Time-averaged total pressure loss coefficient



(b) Time-averaged static pressure rise coefficient

Fig. 6 Effects of excitation frequencies for SCS and UPS ($i=0^\circ$)

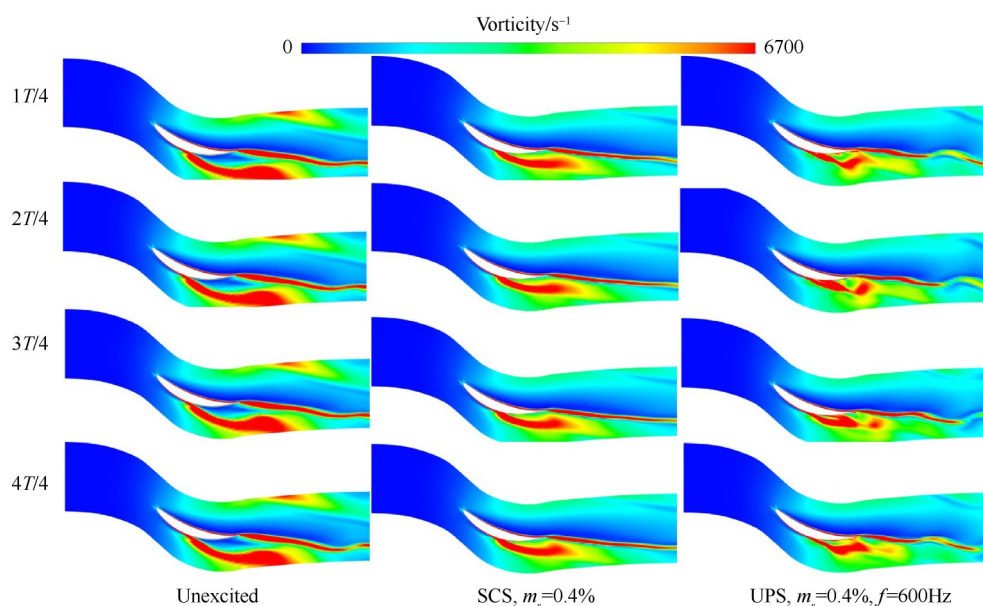


Fig.7 Instantaneous vorticity flow field at 95% span ($i=0^\circ$)

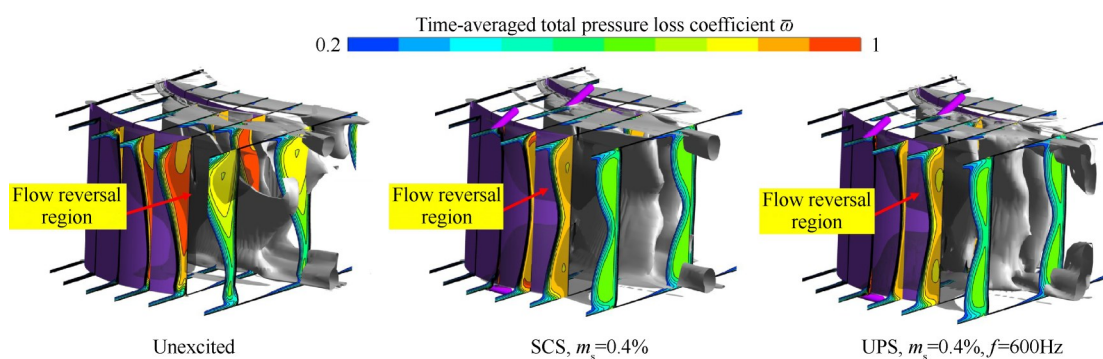


Fig. 8 Isosurfaces of the instantaneous Q -criterion and flow reversal region and the contours of the time-averaged total pressure loss coefficient at different axial location ($i=0^\circ$)

均总压损失云图得知,由这些旋涡结构所引起的损失是有限的,明显小于原流场中高损失区,同时,从图9中总压损失总参数也可以证实,定常抽吸和非定常脉动抽吸作用下,分离减弱而引起的损失减小量要大于附加旋涡掺混及耗散引起的总压损失增加量,因此总性能得到提升。

3.2 变攻角下叶栅气动性能

由于外部环境和工作条件的不断变化,压气机在一些情况下将在非工况下运行,因此,进一步研究和考察非定常脉动抽吸在变攻角下是否也能够较好地改善气动性能是十分有必要的。图10至图13给出选定的 -10° , -5° , 5° 和 10° 攻角下,时均抽吸量 $m_s=0.4\%$ 时,定常抽吸和不同激励频率下非定常脉动抽吸分别对时均总压损失系数和静压升系数的影响。从图10至图13中可以发现,在变攻角下,非定常脉动抽吸仍能在一定程度上降低总压损失和提高静压升,相比于定常抽吸,非定常脉动抽吸在给定的频率

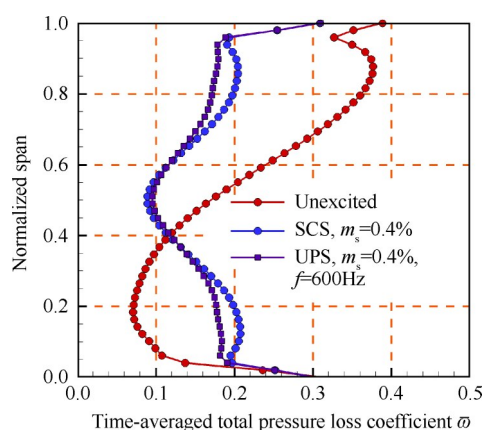


Fig. 9 Span distribution of the time-averaged total pressure loss coefficient ($i=0^\circ$)

范围内仍显示出一定优势。在 -10° , -5° 和 5° 攻角下,定常抽吸和非定常脉动抽吸降低总压损失和提高静压升都相对较为显著。然而在 10° 攻角下,对于定常抽吸,并没有起到改善流场的效果,反而使得损失增

加;对于非定常脉动抽吸,尽管优于定常抽吸,但改善气动性能的效果并不明显,在最优的方案,总压损失也仅减小了1.2%,静压升也只提高了0.6%,远小于其他攻角的情况,出现此种现象的原因将在下文给予分析。

图14所示为 -10° 和 10° 攻角下80%和140%轴向

弦长处的时均总压系数云图和相应的回流区。首先,结合图8,通过回流区的分布情况能够证实不同的攻角下原型方案的分离结构存在一定程度的差异。 -10° 攻角相比于 0° 攻角,分离结构明显减小,上下端区的分离结构并没有完全耦合在一起形成非对称结构,而是形成一种对称形式; 10° 攻角相比于 0° 攻

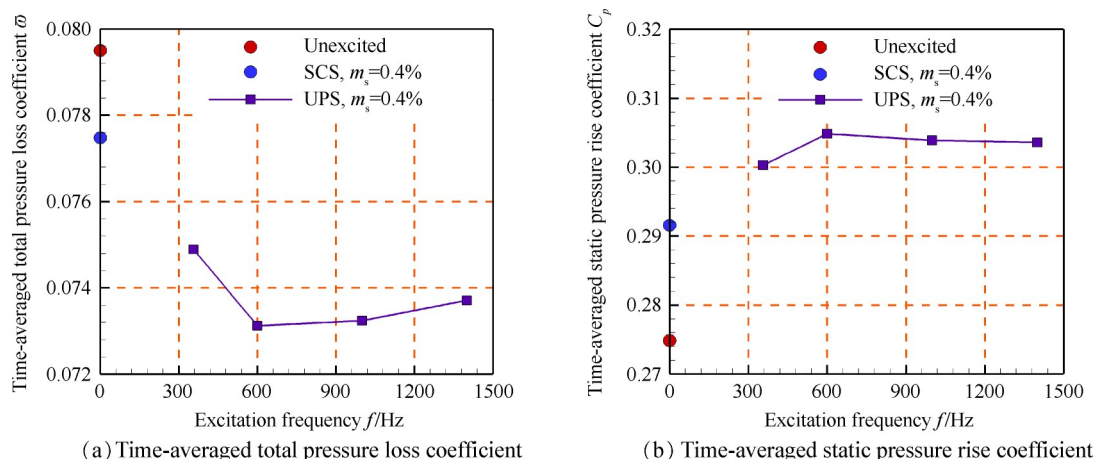


Fig. 10 Effects of excitation frequencies for SCS and UPS ($i = -10^\circ$)

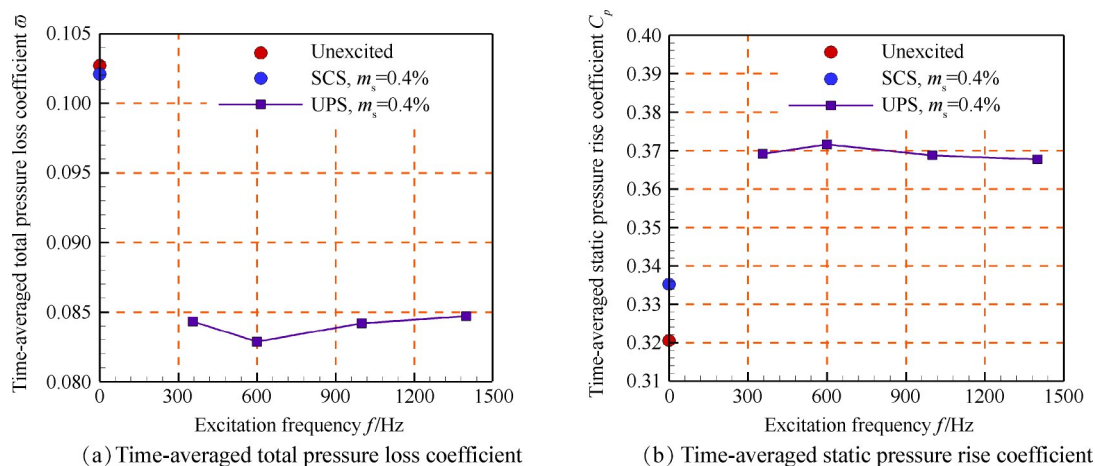


Fig. 11 Effects of excitation frequencies for SCS and UPS ($i = -5^\circ$)

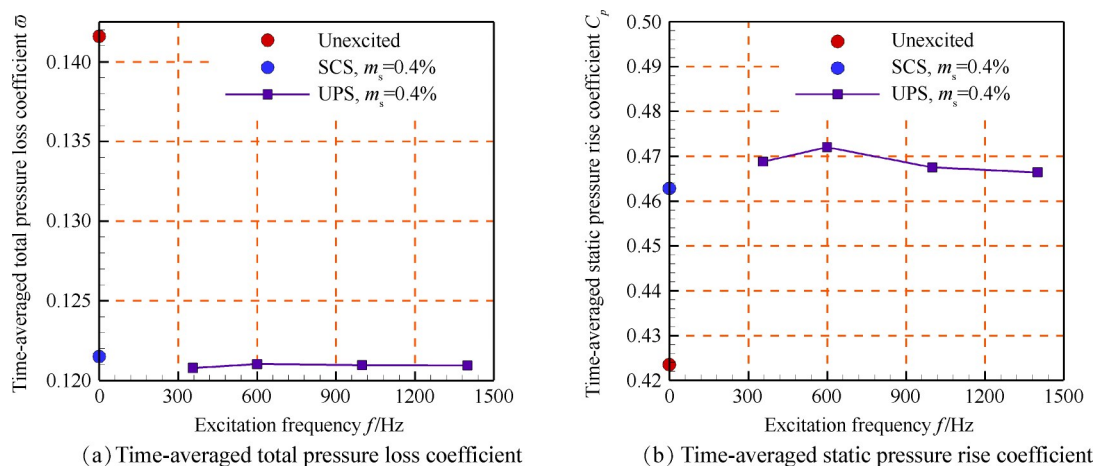


Fig. 12 Effects of excitation frequencies for SCS and UPS ($i = 5^\circ$)

角,分离结构进一步扩大,在整个展向都呈现出大尺度分离的形态。

此外,从图14能够发现,在 -10° 攻角时,定常抽吸作用下,角区损失得到一定程度的减小,而回流区范围并无明显变化;在非定常脉动抽吸作用下,回流区范围被缩小,并且高损失有明显的降低。在 10° 攻角时,相比于原型流场,在定常抽吸和非定常脉动抽吸作用下,流场变化并不明显,非定常脉动抽吸也只是使得损失略有减小。在 10° 大攻角下出现控制效

果不显著的主要原因有两方面:其一,在本文所研究的几何模型和边界条件下,此大攻角时,流场中存在着十分严重的流动分离,而本文只是在上下端壁对称各安装一个引气孔来实现抽吸,时均抽吸量和激励作用区域均相对较小;其二,在文献[25-26]数值和实验结果均表明在角区分离充分发展的区域布置引气孔,不利于气动性能的改善,甚至会出现恶化流场的现象,而本文引气孔处于50%轴向弦长处,在此大攻角时,正位于角区充分发展的区域(由图14可

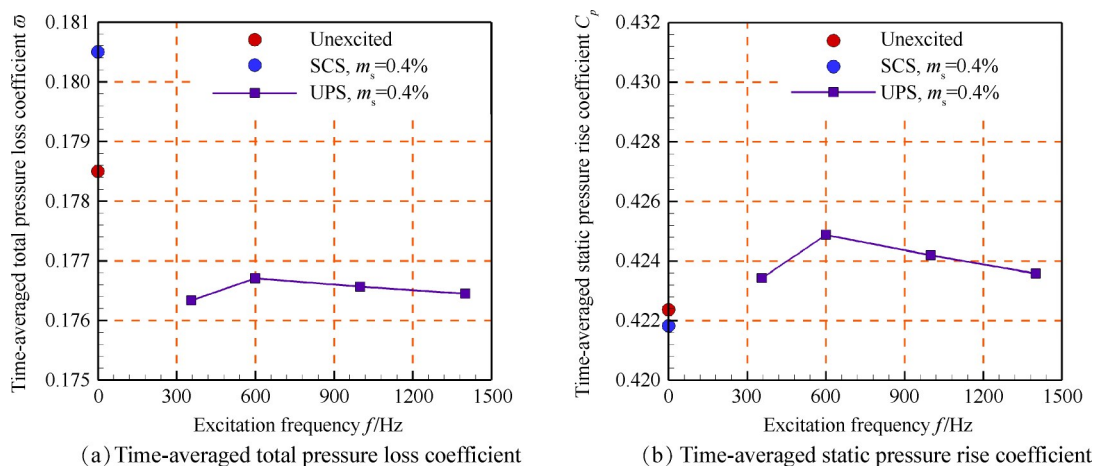


Fig. 13 Effects of excitation frequencies for SCS and UPS ($i=10^\circ$)

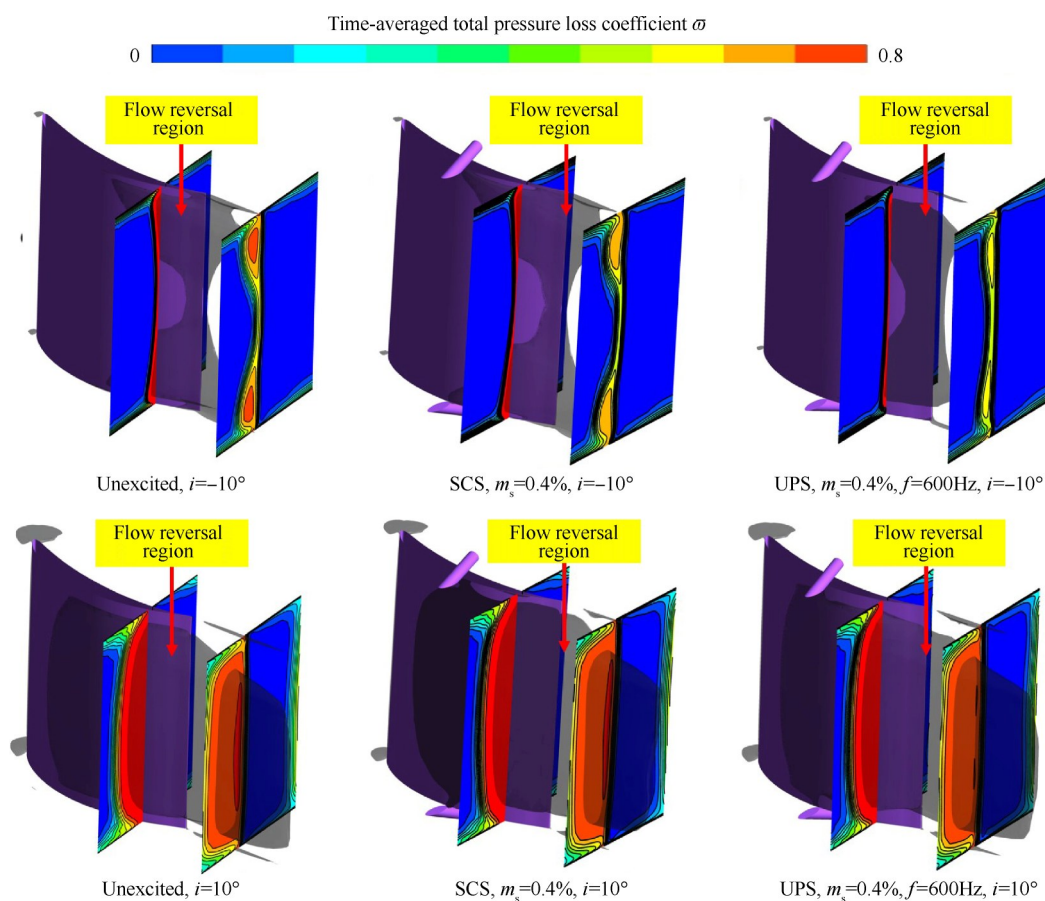


Fig. 14 Flow reversal region and the contours of the time-averaged total pressure loss coefficient at different axial locations

知)。相信通过进一步优化引气孔的几何参数(孔径大小和长度)、布置方式(引气位置和角度)和激励参数(激励频率和激励幅值),以及合理增设引气孔数量,可以提升在大攻角下的气动性能,本文主要是对非定常脉动抽吸在变攻角下控制效果进行初步探索,未来将对上述内容进行更细致的研究。

4 结 论

基于本文所研究的几何模型和边界条件下,得到如下结论:

(1)在设计攻角下,保证相同的时均抽吸量,非定常脉动抽吸控制效果明显优于定常抽吸;在时均抽吸量 $m_s=0.4\%$ 时,在给定的激励频率范围内,非定常脉动抽吸都展现出更好的性能,在最优频率时,损失减小了 9.4%,静压升提高了 12.9%,相比于定常抽吸损失减小了 4.2%,静压升提高了 4.7%。

(2)在变攻角下,在给定的激励频率范围内,非定常脉动抽吸的控制效果仍优于定常抽吸;在 -10° , -5° 和 5° 攻角下,定常抽吸和非定常脉动抽吸降低总压损失和提高静压升都相对较为显著。然而在 10° 攻角下,对于定常抽吸,并没有起到改善流场的效果,反而使得损失增加;对于非定常脉动抽吸,尽管优于定常抽吸,但气动性能的改善效果并不明显,最优的情况下,总压损失也仅减小了 1.2%,静压升也只提高了 0.6%,远小于其他攻角的情况。

(3)时均抽吸量和激励作用区域相对较小,以及引气孔位于角区分离充分发展的区域都是引起大攻角下控制效果不明显的主要原因。通过进一步优化引气孔的几何参数(孔径大小和长度)、布置方式(引气位置和角度)和激励参数(激励频率和激励幅值)、以及合理增设引气孔数量,被认为可以持续提升在大攻角下气动性能的改善效果。

参考文献:

- [1] Schatz M, Thiele F. Numerical Study of High-Lift Flow with Separation Control by Periodic Excitation[R]. *AIAA* 2001-0296.
- [2] Seifert A, Bachar T, Koss D, et al. Oscillatory Blowing: a Tool to Delay Boundary-Layer Separation [J]. *AIAA Journal*, 1993, 31(11): 2052-2060.
- [3] 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.
- [4] Hecklau M, Zander V, Peltzer I, et al. Experimental AFC Approaches on a Highly Loaded Compressor Cascade[M]. *Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg*, 2010: 171-186.
- [5] Hecklau M, Wiederhold O, Zander V. Active Separation Control with Pulsed Jets in a Critically Loaded Compressor Cascade[J]. *AIAA Journal*, 2011, 49(8): 1729-1739.
- [6] De Giorgi M G, De Luca C G, Ficarella A, et al. Comparison Between Synthetic Jets and Continuous Jets for Active Flow Control: Application on a NACA 0015 and a Compressor Stator Cascade [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 43: 256-280.
- [7] Gmelin C, Zander V, Hecklau M, et al. Active Flow Control Concepts on a Highly Loaded Subsonic Compressor Cascade: Résumé of Experimental and Numerical Results[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(6).
- [8] 秦 勇, 王若玉, 宋彦萍, 等. 端壁合成射流对高负荷扩压叶栅损失特性的影响[J]. *推进技术*, 2017, 38(9): 1975-1986. (QIN Yong, WANG Ruo-yu, SONG Yan-ping, et al. Effects of Endwall Synthetic Jet on Loss Characteristics of a Highly Loaded Compressor Cascade. [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(9): 1975-1986.)
- [9] 秦 勇, 刘华坪, 王若玉, 等. 激励参数对合成射流控制压气机流动分离的影响[J]. *推进技术*, 2017, 38(5): 1030-1037. (QIN Yong, LIU Hua-ping, WANG Ruo-yu, et al. Effects of Actuation Parameters on Flow Separation Control in Compressor with Synthetic Jets [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(5): 1030-1037.)
- [10] Zong H H, Kotsonis M. Experimental Investigation on Frequency Characteristics of Plasma Synthetic Jets [J]. *Physics of Fluids*, 2017, 29(11).
- [11] Li L T, Song Y P, Chen F, et al. Flow Control Investigations of Steady and Pulsed Jets in Bowed Compressor Cascades[R]. *ASME GT-2016-56855*.
- [12] Braunscheidel E P, Culley D E, Zaman K B. Application of Synthetic Jets to Reduce Stator Flow Separation in a Low Speed Axial Compressor[R]. *AIAA* 2008-602.
- [13] Kerrebrock J L, Epstein A H, Merchant A A, et al. Design and Test of an Aspirated Counter-Rotating Fan [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2008, 130(2).
- [14] 严红明, 钟兢军, 韩吉昂, 等. 超声速进气道喉部附面层抽吸 [J]. *推进技术*, 2009, 30(2): 175-181. (YAN Hong-ming, ZHONG Jing-jun, HAN Ji-ang, et al. Research on Boundary-Layer Suction in the Throat of Supersonic Inlet [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(2): 175-181.)
- [15] 张龙新, 王松涛, 阮国辉, 等. 超声速低反动度吸附式压气机变工况特性[J]. *航空动力学报*, 2015, 30

- (4): 883–890.
- [16] Qiang X Q, Wang S T, Feng G T, et al. Aerodynamic Design and Analysis of a Low-Reaction Axial Compressor Stage[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 21(1): 1–7.
- [17] Chen S W, Zhou Z H, Wang S T, et al. Numerical Investigation of Boundary Layer Suction on Certain Highly Loaded Aspirated Compressor at Low Speeds[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 232(1): 30–41.
- [18] Huang P G, Bardina J, Coakley T. Turbulence Modeling Validation Testing and Development[R]. *NASA Technical Memorandum*, 1997–110446.
- [19] Bardina J E, Huang P G, Coakley T. Turbulence Modeling Validation[R]. *AIAA* 97–2121.
- [20] Hunt J C R, Wray A A, Moin P. Eddies Stream and Convergence Zones in Turbulent Flows[R]. *Technical Report CTR-S88, Center for Turbulence Research*, N89–24555, 1988: 193–208.
- [21] 梁德旺, 钱华俊. 抽吸孔板的气动实验及附面层抽吸数值模拟[J]. *航空学报*, 2002, 23(6): 512–516.
- [22] Nerger D, Saathoff H, Radespiel R, et al. Experimental Investigation of Endwall and Suction Side Blowing in a Highly Loaded Compressor Stator Cascade[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(2).
- [23] Xu W J, Du X, Wang S T, et al. Correlation of Solidity and Curved Blade in Compressor Cascade Design[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 131: 244–259.
- [24] Zhang L X, Wang S T. A Combination Application of Tandem Blade and Endwall Boundary Layer Suction in a Highly Loaded Aspirated Compressor Outlet Vane[J]. *Journal of Power and Energy*, 2018, 232(2): 129–143.
- [25] 张龙新, 陈绍文, 郭昊雁, 等. 端壁采用孔式抽吸对扩压叶栅气动性能的影响[J]. *推进技术*, 2013, 34(9): 1204–1208. (ZHANG Long-xin, CHEN Shao-wen, GUO Hao-yan, et al. Effects of Endwall Taking Hole-Suction on Aerodynamic Performance of a Compressor Cascade [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(9): 1204–1208.)
- [26] Zhang L X, Chen S W, Xu H, et al. Effect of Boundary Layer Suction on Aerodynamic Performance of High-Turbing Compressor Cascade [R]. *ASME GT-2013-94907*.

(编辑:梅 瑛)