

文章编号: 1000-8055(2006)03-0455-06

环形扩压叶栅流动非定常控制 方法的P IV 研究

弓志强, 陆亚钧, 葛敬东

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院
航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘要: 利用合成射流发生器对于一台环形扩压叶栅进行了流动主动控制的探索, 发现适当的非定常激励方式可以使得环形叶栅的总压损失明显减小。同时利用二维粒子图像测速仪(Particle Image Velocimetry, 简称PIV)测量了扩压叶片绕流流场。获得了不同攻角下, 在不同的激励频率和激励强度下, 流场结构的变化。结果表明非定常激励可以使叶片绕流流场结构发生明显变化。在合适的非定常激励下, 扩压叶片的叶背分离流动得到明显抑制, 尾迹漩涡的强度和尾迹宽度均明显减小, 流线分布比无非定常激励时更加平滑。实验结果能够与环形叶栅时均总压损失的变化相吻合。对于这一非定常控制方法的作用机理也进行了初步的分析。

关键词: 航空、航天推进系统; 环形扩压叶栅; 合成射流; 流动控制; 非定常流动; 粒子图像测速仪(PIV)
中图分类号: V 231.3 **文献标识码:** A

Investigation of Unsteady Flow Control in an Annular Compressor Cascade Using PIV

GONG Zhi-qiang, LU Ya-jun, GE Jing-dong

(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A synthetic jet generator was used as an active control method to control the flow in an annular compressor cascade. It was found that the total pressure loss of the cascade could be reduced effectively. 2D Particle Image Velocimetry (PIV) was used to measure the flow field around the blades. Flow fields were acquired under different incidences, jet frequencies and intensities. It was found that synthetic jet had huge impact on the flow field. With proper jet frequency and intensity, flow separation on the blade suction surface was suppressed evidently, and the blade wake intensity and width were reduced. Streamlines around the blade were smoother. These changes were consistent with the decrease of total pressure loss. The mechanism of this active control method was analyzed.

Key words: aerospace propulsion system; annular compressor cascade; synthetic jet; flow control; unsteady flow; Particle Image Velocimetry (PIV)

收稿日期: 2005-06-08; **修订日期:** 2005-10-28

作者简介: 弓志强(1980-), 男, 山西阳泉人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院航空发动机气动热力重点实验室博士生, 主要从事叶轮机械非定常流动的研究

外流研究中发现,翼型绕流具有固有的非定常性,通过施加一定频率和幅值的非定常控制信号,能够有效抑制流动分离,实现增加升力,减小气动阻力和提高可用攻角的目的^[1~3]。

轴流压气机内的叶片绕流与外流中的翼型绕流有相似之处。如果能够在轴流压气机内实现与外流类似的非定常流动控制,抑制高负荷工况下叶片吸力面的流动分离,则有望提高轴流压气机的压比、效率,扩大稳定工作范围。

文献[4]利用热线风速仪对一台环形扩压叶栅内流动的非定常性进行了测量。发现在稳定工况下,扩压叶片绕流也具有固有的非定常性,在设计流量下其特征频率大约为 720 Hz,随攻角不同略有变化。在此基础上,文献[5]利用合成射流发生器对该环形扩压叶栅进行了非定常流动控制的探索。对于激励的频率、幅值、位置等进行了一系列实验。用叶栅总压损失系数的变化来评价流动控制的效果,发现在适当的激励条件下,时均总压损失系数最多减少了 27.4%。

文献[5]的工作证明了非定常流动控制方法在叶轮机内使用的潜力。但只有时均性能的数据无法对流动控制的作用机理进行解释。为了研究非定常控制机理以及更有效地利用非定常控制的潜力,对于流场细节的了解是必不可少的。

二维 PIV (Particle Image Velocimetry) 技术可以获得一个平面内的瞬时速度场,具有空间分辨率高、获取信息量大、测量速度快、不干扰被测流场和可连续测量等非常实用的优点^[6],为深入研究内流场的时空结构和非定常流动控制的机理提供了契机。

本文主要内容是采用二维 PIV 系统,对于该环形扩压叶栅叶中截面瞬态流场进行了成功测量,得到了激励前后流场结构的变化情况,分析了合成射流与被控流动之间的相互作用。从流场空间结构的角度的角度分析了合成射流非定常流动控制的效果。

1 实验设备、测量手段及试验方案

1.1 环形扩压叶栅实验台

实验在位于航空发动机气动热力重点实验室的低速环形扩压叶栅实验台上进行。

实验台由进气段、测试段、转接段和动力段组成。实验台测试段的进口有一排涡轮叶片作为导向叶片,之后是一排扩压叶片,机匣和叶片由有机玻璃制成。结构如图1所示,叶栅参数如表1

所示。

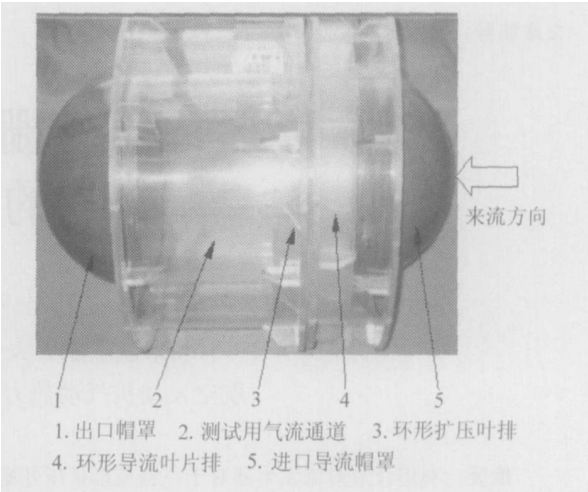


图1 环形叶栅实验台测试段结构图

Fig 1 Annular cascade test section

气源由实验台后部的轴流对旋风机提供,流量为 $3.3\text{ m}^3/\text{s}$, 转速为 $2\,950\text{ r/min}$, 功率为 5.5 kW 。

表1 叶片设计参数

Table 1 Parameters of the blades

几何参数	导向叶片	扩压叶片
叶片数 N	19	19
弦长 C/mm	65	56
叶型进口角 $\beta_{ik}/(^{\circ})$	90	30
叶型出口角 $\beta_{ek}/(^{\circ})$	30	52
叶型弯角 $\theta/(^{\circ})$	60	22

1.2 实验仪器

所使用的主要实验仪器是美国TSI公司生产的二维PIV系统。整个实验系统主要包括激光发生器、CCD相机和采集卡、同步器、示踪粒子发生器和合成射流发生器。

1.2.1 激光发生器

PIV测试系统采用脉冲式双腔Nd:YAG(钕-钇石榴石)激光器,其典型工作频率是10 Hz,每个脉冲能量为200 mJ,脉冲宽度为8 ns。此次实验中两个激光脉冲之间的时间间隔是10 μs 。

1.2.2 数据采集系统

PIV测试系统采用PIV CAM 高分辨(1 024 $\times$ 1 280 像素)CCD 摄像机,每秒钟可拍摄3.75对单张曝光照片。对每对照片进行互相关处理就可以得到一个速度矢量场。因此,此次实验的数据

采集频率是 3.75 Hz, 即每秒钟 3.75 个速度矢量场。

采用的 PIV 系统控制和数据分析软件为 Insight 3.0。

1.2.3 示踪粒子发生器

PIV 测试系统采用 L ZL 型粒子发生器, 工作物质为乙二醇, 其特点是: 可以连续均匀地发烟; 所产生地粒子直径为 0.6~1.2 μm; 不污染设备; 对人体无害。

1.2.4 合成射流发生器

合成射流发生器由 4 个部分组成: 信号发生器、功率放大器、扬声器和导声管。

信号发生器为 XD2 信号发生器, 其输出频率范围为 0.01~10 000 kHz, 功率放大器为 AV-212 功率放大器, 其频率响应为 80~1 2500 Hz。扬声器为一个电动喇叭, 设计功率为 100 W。

单频声音信号由信号发生器产生经功率放大器放大后, 由扬声器发出并经过导声管传递到所需激励的位置。

1.3 实验方案

本实验设计了 5°, 10°, 16° 和 18°, 4 个来流攻角。在每个攻角下, 采用文献[5]中的激励方案对扩压环形叶栅流场进行非定常激励, 并利用 PIV 测试系统对扩压叶栅一个栅距的范围内的叶片 50% 叶高截面上的流场进行测量, 每个工况下得到一系列瞬时二维速度场分布。

实验装置及测量仪器的布局如图 2 所示。

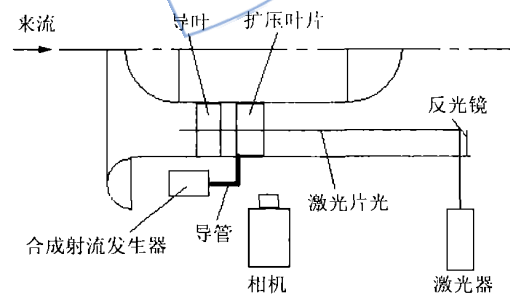


图2 实验装置及测量仪器的布局

Fig. 2 Research facility and measurement layout

首先利用片光镜头将脉冲式双腔 Nd:YAG (钕- 钹石榴石) 激光器产生的激光束变成片光, 然后采用自制的平面镜导光装置将激光片光导入压气机内。平面镜位于实验段下游, 激光片光由下游反射向上游照亮待测流场区域。

由于这个实验段采用有机玻璃制作而成, 避

免了解决 CCD 摄像问题而在机匣上开窗口的问题, CCD 摄像机透过有机玻璃机匣可以直接进行摄像。

由于激光在叶片和机匣上的强烈反光会损害 CCD 相机的感光元件, 因此反光必须避免。

本实验中, 用炭粉将待测叶片涂黑, 在机匣片面叶片顶部的位置粘贴挡光材料, 基本上解决了反光的问题, 满足了实验需要。但同时会导致叶片表面附近的流场无法测得。

2 实验数据处理与结果分析

2.1 实验数据处理方法

由 CCD 拍摄得到的原始数据是流场中粒子的象的照片, 实际测量面积为 165 mm × 210 mm。利用 Insight 3.0 软件将整张照片划分为一个 64 × 64 像素大小的查问区, 两个查问区之间有 50% 的重叠。则测量面积内可以得到 1 280 个点的速度。进而可以得到瞬时和平均涡量分布。

2.2 非定常激励对于流场空间结构的影响

图 3 表示未施加非定常激励时, 在相同进口流量, 不同攻角下测得瞬时流场的涡量分布图。一

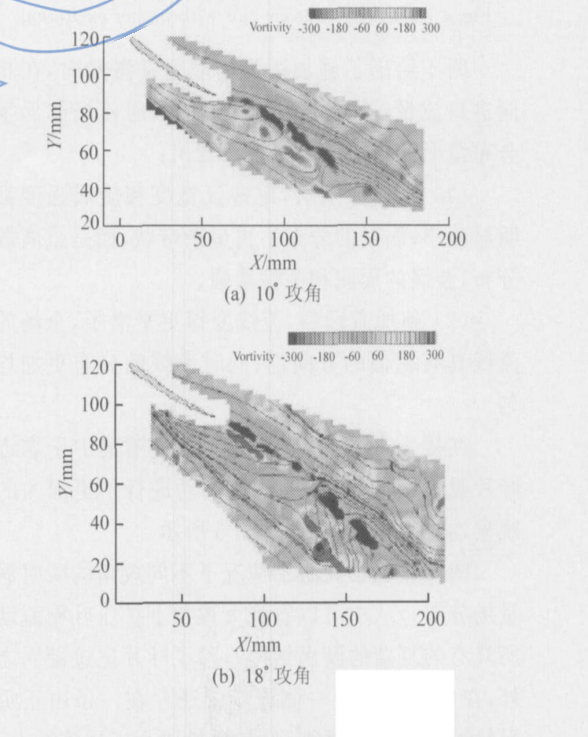


图3 无激励被测流场涡量谱图

Fig. 3 Vorticity contour plot without excitation

个值得关注的地方是: 尾迹漩涡并未表现出所预期的一个个离散漩涡的状态, 而是在流向上形成

条带状的高涡量区域。这说明此时的尾迹中存在着大量尺度相对较小的漩涡,而不是离散的大涡,从而造成较大区域内涡量值都很高。

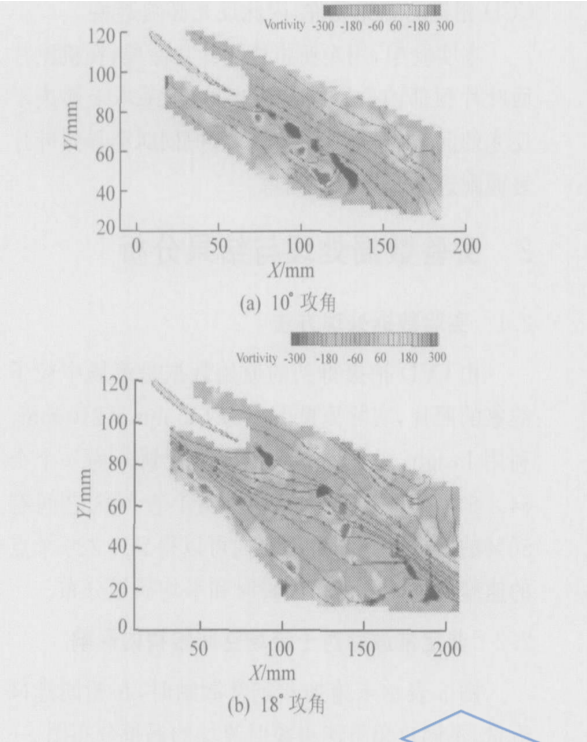


图4 施加适当激励被测流场涡量谱图

Fig 4 Vorticity contour plot with proper excitation

图4给出了施加适当的非定常激励时,在相同进口流量,不同攻角下测得的瞬时流场的涡量分布情况。与图3对比可以看出:

- (1) 施加激励后,尾迹区宽度和旋涡强度都明显减小;涡量的分布不再呈条带状,而是呈离散分布,漩涡的周向相关性增强。
- (2) 施加激励后,流线变得更平滑了,全场的流线具有相似的方向性;同时流线的分布更加均匀。

在接下来的实验中,将测量范围集中于靠近叶片吸力面的区域,对叶背流动进行了更深入的观察,测量结果如图5和图6所示。

图5显示了无激励情况下不同攻角的瞬时涡量场分布。从中可以看到大攻角下扩压叶栅流动所具有的复杂的漩涡结构。除了叶片尾迹漩涡之外,在叶片吸力面一侧流场中还有一条由正负涡量漩涡构成的涡街,只是涡量要小于尾迹漩涡。在最小的 5° 攻角时,这条涡街很靠近叶片吸力面,随着攻角的增大,这条涡街逐渐离开了叶片表面。由于尾迹涡街是由于叶片尾缘后的减切层失稳形成的,因此可以推断叶片吸力面一侧的这条

涡街,是由于叶背流动分离形成的分离面减切层失稳造成的,可以称之为分离边界涡。随着攻角的增大,叶背分离区的范围也逐渐增大,因此分离边界涡的位置就逐渐远离了叶片表面。

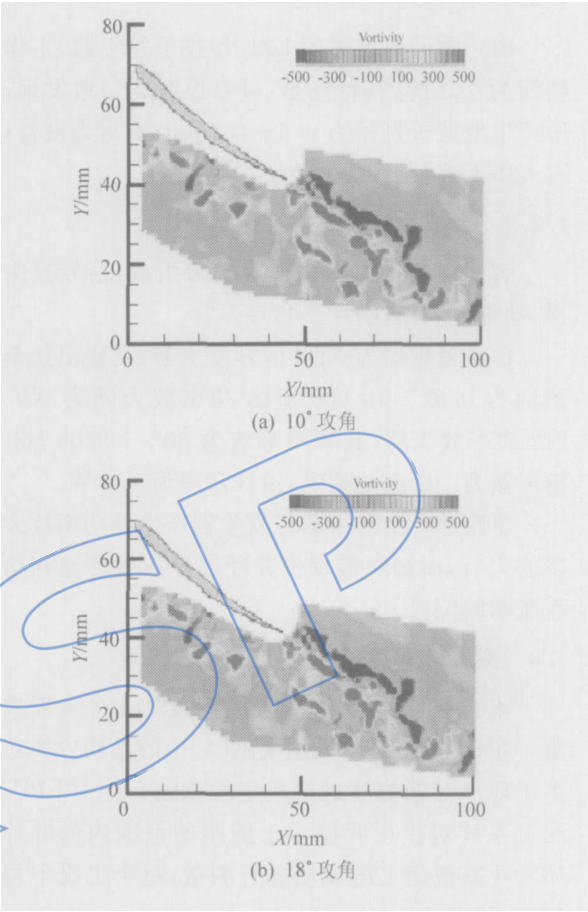


图5 无激励被测流场涡量谱图

Fig 5 Vorticity contour plot without excitation

在施加适当的非定常激励后,如图6所示,分离边界涡和尾迹涡的涡量和涡街的宽度都有所减小,漩涡的相关性更好了,呈现出离散漩涡的形态,从而使得流动的掺混损失能够减小。分离边界涡相比于无激励的情况稍稍靠近了叶片吸力面。这一结构的变化能够定性地说明,非定常激励对于大攻角下的流动分离具有一定的抑制作用。

这些瞬时流场空间结构的变化是否能够导致流场时均性能的改善呢?将每个工况下60个速度场进行平均,得到这一工况下的平均速度场,来分析非定常激励对此环形叶栅时均性能的影响。

图7显示的是不同攻角下无激励和施加有效非定常激励得到的叶栅出口处的平均速度分布,代表了叶片尾迹亏损的情况。可以看到,在施加适当的非定常激励后,各个攻角下的尾迹亏损状况都有所改善。尾迹亏损的减少,也说明了黏性损失

的减少。

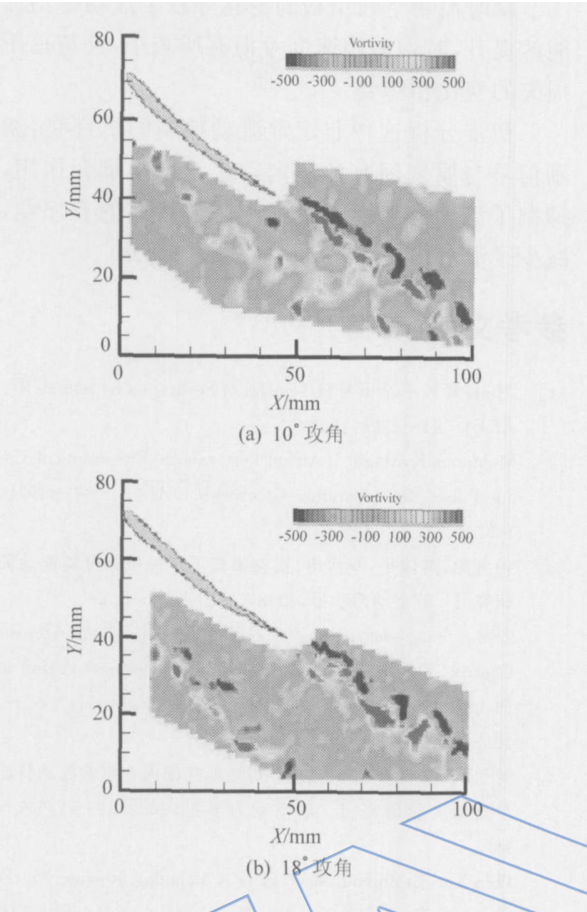


图6 有激励被测流场涡量谱图

Fig 6 Vorticity contour plot with proper excitation

图8显示的是文献[5]实验中10°攻角下在施加激励前后叶栅尾缘总压损失的分布情况,与图7(b)的情况吻合的比较好。

2.3 非定常激励作用机理分析

利用合成射流发生器产生的非定常激励对于此环形扩压叶栅瞬时流场空间结构的影响主要有:大攻角下叶背流动分离和尾迹速度亏损得到抑制;尾迹漩涡和叶背分离边界涡的形态发生变化,从许多尺度不一的漩涡趋向于离散的漩涡结构,流动从无序趋向于有序状态,从而可以减少流动掺混带来的黏性损失。初步分析此非定常激励的作用机理是:剪切层流动具有固有的不稳定性,扩压叶栅中尾缘和分离流剪切层的失稳产生了复杂的漩涡运动,其漩涡运动是具有一定周期性特征的,从而在流动的频谱特性中存在一个幅值占优的特征频率。非定常激励与周期性的旋涡运动在频率接近的情况下发生耦合,抑制了尾迹和流动分离,使得流动更加有序,从而减少了黏性损失。

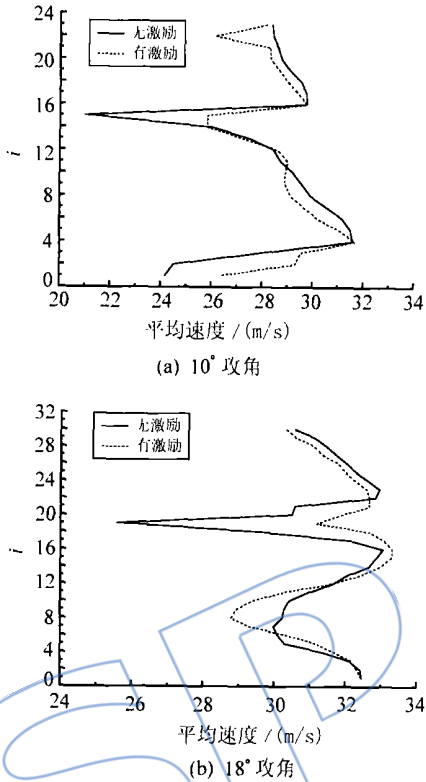


图7 激励前后扩压叶栅出口速度分布
(i 代表沿栅距方向的测点序号)

Fig 7 Absolute velocity distribution at the trailing edge of the cascade with/w without excitation
(i represents the circumferential location)

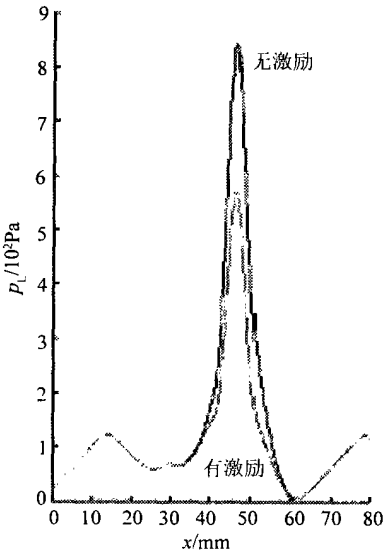


图8 10°攻角有无激励情况下叶栅后总压损失分布

Fig 8 Total pressure loss distribution at the trailing edge of the cascade at 10° attack angle with/w without excitation

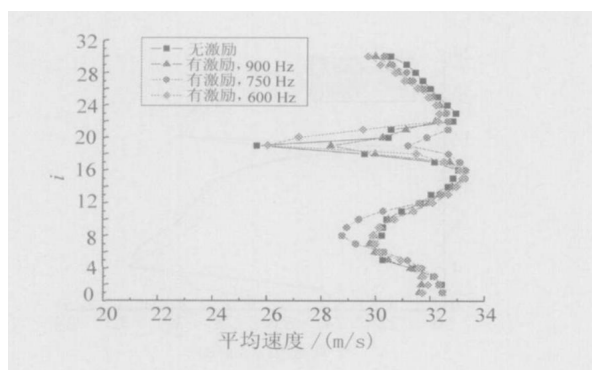


图9 18 攻角不同激励频率下尾迹亏损,
激励功率相同

(i 代表沿栅距方向的测点序号)

Fig 9 Wake velocity deficit at different excitation
frequencies at 18° attack angle,
with same excitation power
(i represents the circumferential location)

还有一个现象可以作为这一解释的证明: 此非定常流动控制的效果受激励信号的频率影响很大, 一旦激励频率偏离最佳频率, 控制效果很快减弱, 如图9所示。这种对频率的强烈依赖性正是共振的特征。

3 结 论

本文利用合成射流发生器作为激励源, 对于环形扩压叶栅进行了非定常流动控制的探索, 得到了初步的成果。利用二维P IV 技术测量了这种非定常控制技术给流场结构带来的变化。

通过无激励时不同攻角下的流场结构的对比, 发现随着攻角的增大, 流场的尾迹漩涡和分离边界漩涡的强度和分布范围逐渐增大, 流线变得更加曲折且分布不均匀性增加。这些都说明了, 随着攻角增大, 流场的无序性增加, 从而导致黏性损失的增加, 最终导致扩压叶栅的气动性能下降。

在施加了适当的非定常激励以后, 大攻角下的流动分离得到一定的抑制, 尾迹漩涡和分离边界漩涡的强度和分布范围减小, 特别是呈现出离散漩涡的形态。流线变得平滑, 在分布上更加均匀。

整个流场呈现出更加平稳有序的状态。

瞬时流场空间结构的变化导致了流场时均性能的提升, 时均尾迹速度亏损有所减小, 且与总压损失的变化相吻合。

初步分析这种非定常流动控制的机理是: 激励信号与原来固有的非定常流动产生耦合作用, 抑制了流动分离而且增强了尾迹漩涡的有序性, 减少了流动掺混, 从而减少了黏性损失。

参考文献

- [1] Ahuja K K, Burrin R H. Control of Separation by Sound [R] AIAA - 84- 2298, 1984
- [2] McManus K, Magill J. Airfoil Performance Enhancement Using Pulsed Jet Separation Control [R] AIAA - 97- 1971, 1997
- [3] 钟芳源, 董国平, 罗次申. 扰动来流下声控机翼分离流动的研究[J]. 航空动力学报, 1998, 13(2): 113~ 118
Zhong Fang-yuan, Dong Guo-ping, Luo Ci-shen. Aoustic Control of Separated Flow over a 2-Dimensional Airfoil at Disturbed Incoming Flow [J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(2): 113~ 118
- [4] 闻学, 李志平, 周海, 葛敬东. 对环形叶栅内非定常流动特征参数的实验研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 561~ 566
Wen Xue, Li Zhiping, Zhou Hai, Ge Jingdong. Research of the Unsteady-Fluid Characteristic Parameter in an Annular Cascade [J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(5): 561 ~ 566
- [5] 邱亚希, 葛敬东, 周海, 陆亚钧. 环形叶栅内利用非定常激励减少分离区损失的研究[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(1): 18~ 23
Qiu Yaxi, Ge Jingdong, Zhou Hai, Lu Yajun. Research on the Effects of Unsteady Excitation on Enhancing Performance of Annular Cascade [J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(1): 18~ 23
- [6] 刘宝杰, 严明, 刘胤, 王同庆. 跨音风扇转子尖部非定常流场的P IV 初步测量[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 147~ 152
Liu Baojie, Yan Ming, Liu Yin, Wang Tongqing. Preliminary PIV Measurement of Unsteady Tip Flow in a Transonic Fan Rotor [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 147~ 152