

脉冲射流控制弯曲扩压管道流动分离的特点

朱剑锋^{1,2}, 黄国平¹, 傅鑫¹, 付勇¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 中航工业集团 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412000)

摘 要: 结合弯曲扩压通道的脉冲射流总体控制规律,开展了不同射流频率下通道内流场的稳定及动态特性分析. 研究表明:定常射流控制状态下,流场内沿径向不同位置流动特性的变化幅度基本相同,定常射流通过压制通道内复杂流动现象达到整体线性地改变通道内流场特性的效果;而在合理脉冲射流控制状态下,脉冲射流对流场的影响主要是通过改变分离涡的脉动时空特性,沿径向逐步增强对流场的影响,从而使主流区内总压损失降低幅度最为明显,此时扩压通道内占主导地位分离涡的周期性特征有了明显的改善,流场拟序结构更为有序.

关 键 词: 脉冲射流; 非定常; 流动分离; 弯曲扩压管道; 分离涡

中图分类号: V211⁺5, V231.1

文献标志码: A

Characteristic of controlling flow separation in divergent curved channels by pulsed jet

ZHU Jian-feng^{1,2}, HUANG Guo-ping¹, FU Xin¹, FU Yong¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. China Aviation Powerplant Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: Combined with the pulsed jet overall control ruler of divergent curved channels, the steady and unsteady characteristics of flow fields in channel under different frequency states were analysed. Results show that the flow characteristics change amplitude is similar along the radial direction under steady control state, and the influence of steady jet suppresses the complex flow phenomenon and linearly changes the flow characteristic of the flow field. Under suitable pulsed jet control state, the influence of pulsed jet on the flow field is presented by changing the fluctuation time-space characteristic of separation vortex, so that the influence amplitude increases along the radial direction, and the decreased magnitude of total pressure loss in the mainstream region is more obvious; meanwhile, the periodic characteristic of the dominant separation vortex is improved significantly, and the flow coherent structure is more orderly.

Key words: pulsed jet; unsteadiness; flow separation; divergent curved channels; separation vortex

随着现代高负荷压气机级压比的逐渐提升,叶片吸力面附面层在强逆压力梯度的作用下越来越容

易产生大尺度分离流动现象,从而导致压气机效率的下降及稳定工作范围的减小,在某些严重分离流

动状态下可能将对发动机工作稳定性产生明显的影响. 因此,选择合适的流场控制手段以保证压气机在高负荷状态下还能保持较高的效率及宽广的稳定工作范围得到了越来越多研究人员的关注^[1-2].

相比于定常射流控制,非定常射流控制有效抑制气流分离所需的激励能量可显著减少,因此研究人员开始尝试在叶轮机械中采用非定常流场控制技术以缓解高级压比和高效率之间的矛盾,其中比较有代表性的研究工作有德国 Gmelin 和 Hecklau 等^[3-4]及 ZHENG Xinqian 等^[5-6]的研究. 郭明等前期在开缝叶片^[7]、串联叶栅^[8-9]等被动控制方式及吸附式控制^[10]、合成射流控制^[11-12]等主动控制方式的基础上,提出了一种新型的无源引气微脉冲射流控制的概念^[13]. 该无源引气微脉冲射流控制技术通过周期性的流道开关产生一定频率的脉冲射流,依靠特定频率的脉冲射流达到控制分离区内非定常分离涡的目的. 更多关于该控制方式的特点及其与开缝叶片、合成射流等流场控制方式的对比参考文献^[14].

然而,针对叶轮机械内复杂分离流动进行一种新型的非定常射流控制尝试,首先需针对该控制方式的控制机制进行深入的分析. 虽然无源脉

冲射流控制方式的作用机理也可参照其他关于非定常射流控制机理的研究来大致理解,但是目前专门针对该控制方式的控制机理国内外都没有相关研究工作报道,一些重要因素对控制效果的影响规律也有待澄清,此外目前对于非定常射流控制机制的认识更多来自于外流问题^[11,15]. 因此,朱剑锋等前期结合该非定常射流控制技术的特点,建立了一套仿叶栅弯曲扩压通道实验平台^[14],目前初步实验已取得了约 5.5% 的控制效果,更多实验结果参考文献^[16].

本文结合脉冲射流对弯曲扩压管道总体性能的影响规律,实验测量了通道内某一流向位置沿宽度方向不同位置的压力分布,通过分析测点压力波动的总体、空间及时间特性,进行了通道内流场的稳态及动态特性分析,初步得到了定常及非定常射流对通道内流场的影响机制.

1 实验系统及测量方案

基于南京航空航天大学微型发动机研究所提出的新型无源引气微脉冲射流控制的概念^[13],本文前期建立了一套仿叶栅弯曲扩压通道实验平台,如图 1 所示. 图中 z 为延叶高方向坐标; L 为

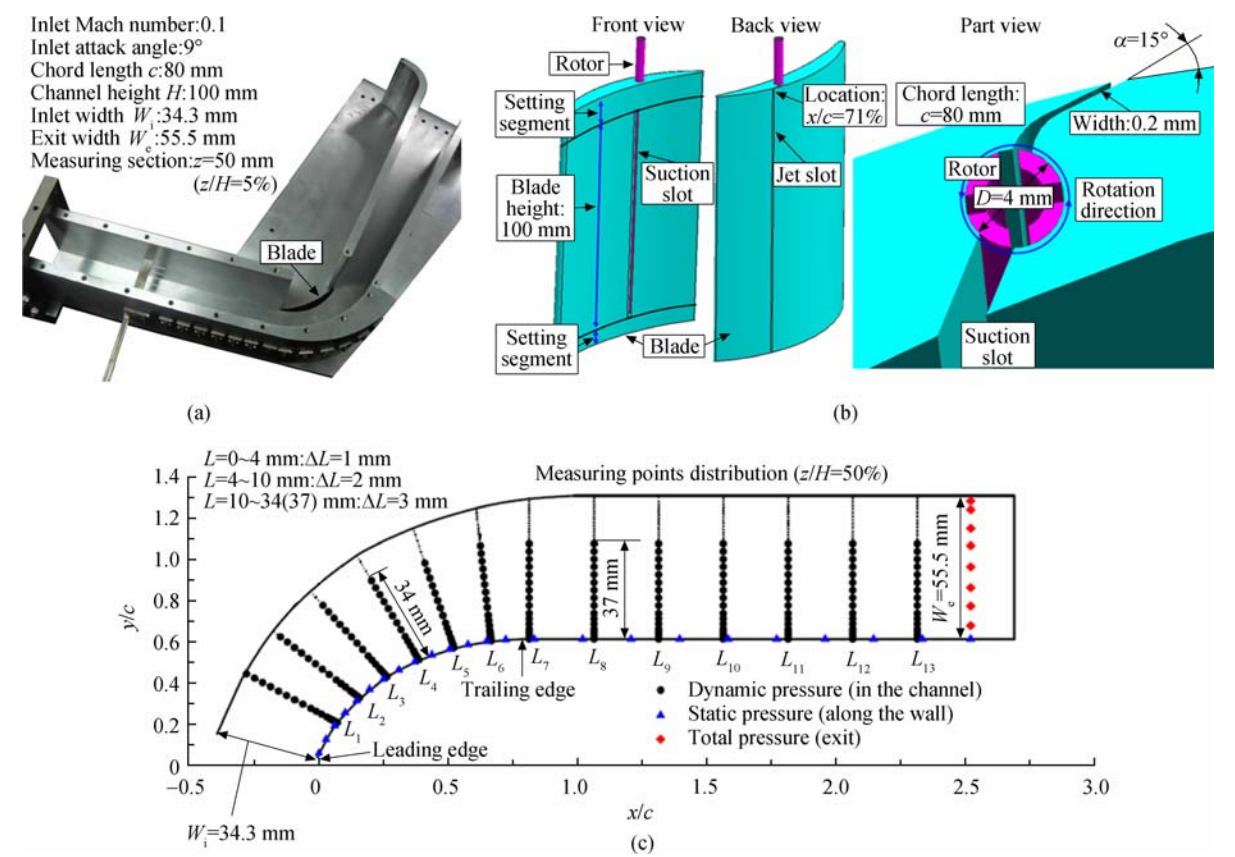


图 1 实验模型、控制方式及测点分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental model, control method and measuring points distribution

测点延通道宽度方向的测点位置, ΔL 为相邻测点之间的间距. 实验模型及进口状态见图 1(a). 实验过程中射流缝出口角度、宽度、位置见图 1(b), 其中射流位置位于分离点附近. 实验过程中测点分布见图 1(c). 图 1(c) 中 $L_1 \sim L_5$ 位置沿通道宽度方向, 测点范围为 $0 \sim 34 \text{ mm}$, $L_6 \sim L_{13}$ 位置沿通道宽度方向, 测点范围为 $0 \sim 37 \text{ mm}$. 更多研究背景及实验系统的介绍请参考文献[14].

2 总体控制效果介绍

基于弯曲扩压通道稳态及动态压力特性, 开展了频率为 $60 \sim 600 \text{ Hz}$ 的脉冲射流对弯曲扩压通道内分离流的实验研究, 其中通道内分离涡主频约为 266 Hz . 图 2 即给出了脉冲射流的总体控制效果图, 其中横坐标为折合射流频率, 纵坐标为相对损失系数. 折合射流频率 $F^+ = f/f_{\text{shed}}$, f 为射流频率, f_{shed} 为无控状态下通道内分离涡主频; 相对总压损失系数 $\bar{\omega}_r = (\bar{\omega} - \bar{\omega}_0)/\bar{\omega}_0 \times 100\%$, 总压损失系数 $\bar{\omega} = (p_i^* - p_o^*)/(1/2\rho_0 V_0^2)$, p_i^* 表示进口平均总压, p_o^* 为出口平均总压, $1/2\rho_0 V_0^2$ 表示进口动压头, $\bar{\omega}_0$ 表示无控状态下总压损失系数.

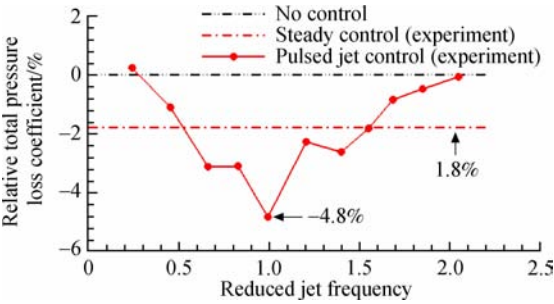


图 2 相对总压损失系数随折合射流频率的变化
Fig. 2 Relative total pressure loss coefficient varying with reduced jet frequency

由图 2 可知: 当折合射流频率接近 1 时, 弯曲扩压通道相对损失系数减小了 4.8%, 脉冲射流控制效果最为明显; 而随着折合射流频率增大或减小, 相对损失系数增加, 控制效果减弱, 更多实验结果的介绍请参考文献[14]. 值得补充说明的是, 通道内分离涡频率的测量主要是基于 L_9 位置 (如图 1(c) 所示) 沿不同宽度方向的频谱分布所得, 其中沿宽度方向各个位置频率为 266 Hz 对应的幅值均最为明显; 随着测点位置逐渐由壁面向通道内部移动, 频率为 266 Hz 对应的压力频谱幅值存在先增大后减小的趋势, 且基于 266 Hz 计算得出的斯特劳哈尔数 $Sr = 0.18$, 与参考值为

$0.17 \sim 0.19$ 十分吻合, 因此可将频率为 266 Hz 认为是通道内分离涡主频. 更多无控状态下分离涡主频的判断方式、通道内稳态及动态压力特性、不同控制状态下通道内总体特性变化的分析请参考文献[14].

3 流场稳态特性分析

由总体控制效果可知, 当脉冲射流频率接近通道内分离涡主频时, 控制效果最为明显. 为了进一步分析脉冲射流对通道内分离涡的影响机制, 本文首先针对不同控制状态下通道内流场的稳态特性进行了分析, 具体而言则是主要分析了在不同控制状态下壁面静压及出口总压损失系数分布, 如图 3 及图 4 所示.

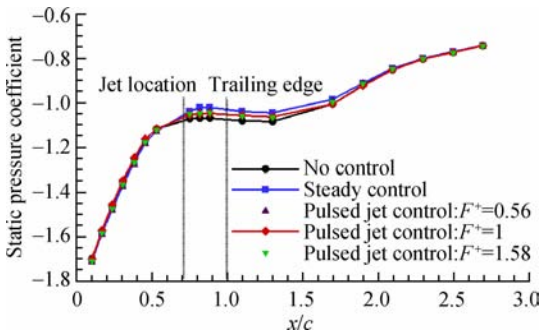


图 3 不同状态下通道沿程静压系数分布
Fig. 3 Static pressure coefficients distribution under different states

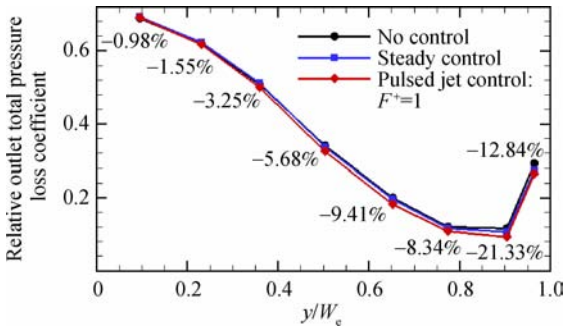


图 4 不同状态下出口相对总压损失系数分布
Fig. 4 Relative outlet total pressure loss coefficient distribution under different states

结合图 3 给出的无控、定常射流及不同频率脉冲射流控制状态下的通道内沿程静压分布可知, 随着射流的注入, 射流器出口附近沿程静压有所提升, 且定常射流控制状态下静压提升最为明显, 而各个频率脉冲射流控制状态下静压分布介于定常射流控制及无控状态之间, 其可能原因是定常射流控制状态下射流流量较脉冲射流流量

大,因此其静压变化最为显著。相比于射流缝出口附近静压分布变化规律,再附点下游各个状态下沿程静压分布基本一致,该特征表明定常及非定常射流主要影响着射流器出口附近及分离区内静压分布,对分离区下游沿程静压分布的影响相对较小。而在非定常射流控制状态下,不同频率的脉冲射流对通道沿程静压分布的影响基本一致,且脉冲射流对壁面静压的影响主要集中在脉冲射流出口位置,在远离喷口处,脉冲射流对通道壁面静压分布基本不再产生明显的影响。

相比于沿程静压变化规律, $F^+=1$ 脉冲射流控制状态下,出口总压损失在各个宽度方向位置均有着明显的下降。其中在靠叶片下表面侧即图 4 左侧分离涡影响区域内,总压损失降低的幅度相对较小,而随着测点逐渐向通道内部移动,总压损失降低幅度逐渐增加,并在主流区附近损失降低幅度最为明显。而定常射流控制下各个宽度方向位置损失降低幅度基本一致,脉冲射流控制与定常射流控制在损失降低的空间分布上有着明显的区别,该区别的产生机制将在 4 节中结合流场动态特性的变化进行分析。

4 流场动态特性分析

结合通道出口损失分布可知,脉冲射流与定常射流在损失降低的空间分布上有着明显的区别。为了进一步分析该现象产生的物理机制,本文将针对 L_9 位置(参照图 1(c)所示)沿宽度方向不同测点的动态压力特性进行分析,力求从不同测点的总体压力波动特性、空间频谱分布及时间周期性这 3 个方面出发,初步探索定常及非定常射流对通道内流场的影响机制。

4.1 总体特性分析

为了把握弯曲扩压通道内流动的非定常特性,引入了标准差 σ 进行压力波动程度的评估。

$$\sigma =$$

$$\sqrt{[(p_1 - \bar{p})^2 + (p_2 - \bar{p})^2 + \dots + (p_N - \bar{p})^2] / N}$$

式中 p 为测点压力值; $\bar{p}$ 为平均压力值, N 为测点样本数目。标准差 σ 越大,则测点位置处非定常特征越明显,表明测点位置流体质点受分离涡的影响就越大。

对比图 5 给出的不同状态下 L_9 位置沿宽度方向不同测点的动态压力得到的标准差分布可知,定常射流控制状态下各个测点压力波动幅值基本均小于其他状态对应位置的压力波动,通道

内压力波动强度在定常射流控制的作用下得到了有效的抑制;该特征表明定常状态下注入的“稳定”的射流将使得流场内“不稳定”的旋涡运动趋于“稳定”工作状态,从而达到整体压制通道内复杂流动,抑制通道内旋涡的运动特性的目的。

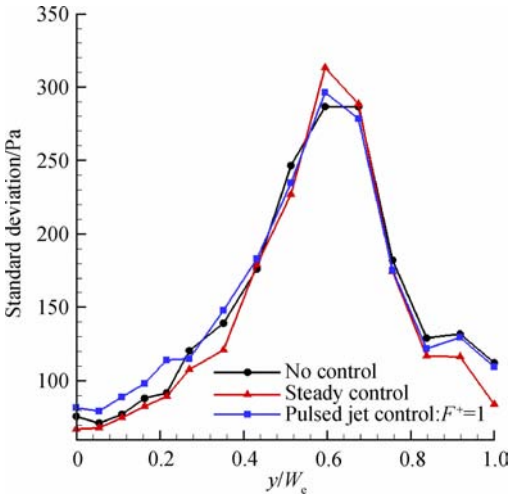


图 5 沿宽度方向不同状态下标准差分布(L_9 位置)
Fig. 5 Standard deviation distribution of along width direction in different states (L_9)

在脉冲射流控制状态下,由于射流出口注入的脉冲射流其本身是具有明显周期性的射流,该射流的注入将使得壁面附近流体的波动特性有所增强,对应的标准差幅值在壁面附近较无控状态有着明显的增加;而相比于壁面附近标准差分布,在通道内部标准差分布较无控状态有一定程度的降低,该特征反映在合理频率的脉冲射流作用下,通道内分离涡强度有一定程度的降低,对应的总体控制效果较为显著。该实验结果与文献[17]采用本征正交分解(POD)方法得到的定常及非定常射流控制机制基本一致,提升了本文实验分析结果的准确性,更多关于 POD 分析结果的介绍请参考文献[17]。

4.2 空间特性分析

在总体波动特性的基础上,本文给出了沿宽度方向不同空间位置测点压力的频谱特性分布,如图 6 所示。图中 A 为测点压力频谱幅值, $A_{\max}$ 为沿线方向不同测点的最大压力频谱幅值。对比图中无控及定常射流控制状态下频谱特性的空间分布可知,定常射流控制状态下不同空间宽度方向位置测点的频谱特性与无控状态基本保持不变,对应的流场内涡系结构分布与无控状态一致,因此得到的通道出口总压损失降低幅度沿宽度方向

分布较为均匀. 综合流场的稳态及动态特性变化规律可知: 相比于无控状态, 定常射流控制状态下, 流场内沿宽度方向不同位置流动特性的变化幅度相同, 其控制效果沿空间分布为线性分布, 定常射流通过整体压制通道内复杂流动、抑制通道内旋涡的运动特性达到整体线性地改变通道内流场特性的效果.

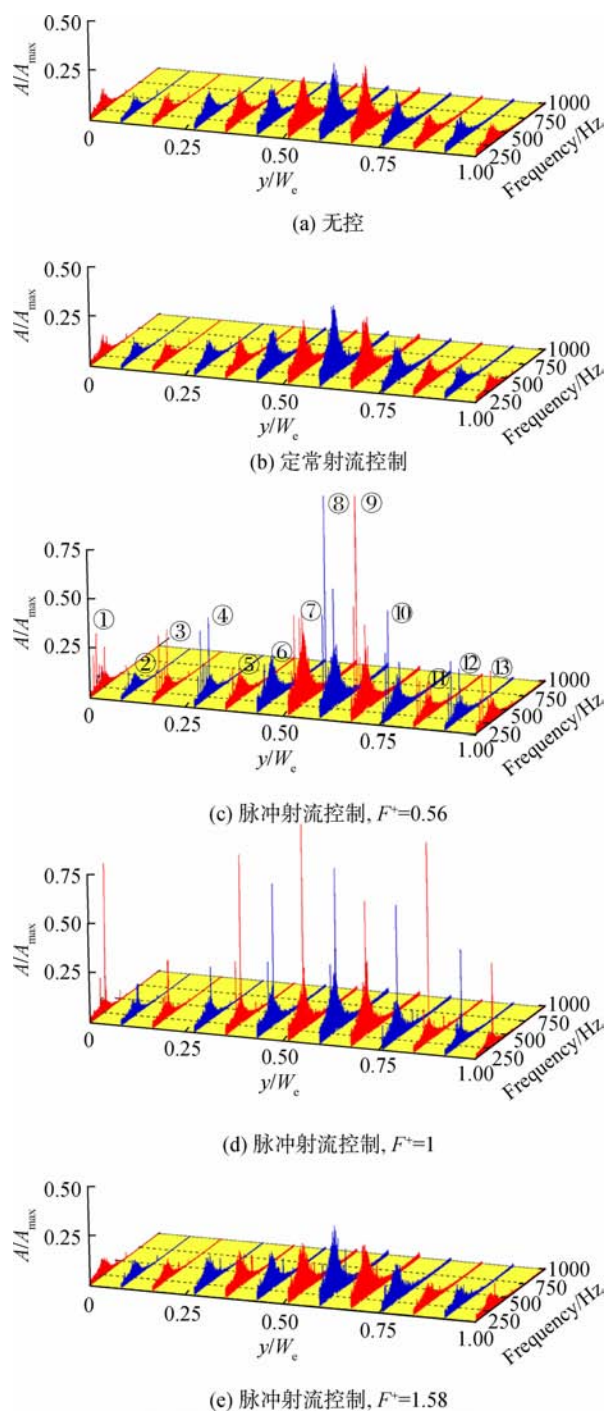


图 6 不同状态下压力频谱分布 ($A_{\max}=62\text{ Pa}$)
Fig. 6 Pressure spectrum distribution under different state ($A_{\max}=62\text{ Pa}$)

不同于定常射流控制状态, 非定常脉冲射流控制状态下各个空间位置频谱特性的变化并不相同, 其中 $F^+=0.58$ 状态下各个宽度方向位置在射流频率附近的频谱幅值有着一定的改变, 并在 L_8, L_9 位置改变幅度最为明显. 而在 $F^+=1$ 脉冲射流控制状态下, 除分离区内 L_2, L_3, L_4 位置, 其余沿宽度方向各个位置频谱幅值均有较为明显的改变, 并在 $L_5 \sim L_{13}$ 位置变化最为明显, 频谱特性变化显著的范围明显大于 $F^+=0.58$ 状态, 沿宽度方向频谱幅值变化明显区域对应的出口总压损失降低也十分明显. 而随着折合射流频率的进一步增加, 各个周期内射流的能量逐渐减小, 流体受脉冲射流的影响减弱, 各个位置频谱特性又逐渐趋向于无控状态 ($F^+=1.58$).

对比不同频率状态下的压力频谱特性与出口总压特性变化规律可知, 当折合射流频率与通道内分离涡主频基本一致时, 脉冲射流对流场内沿宽度方向不同位置质点流动特性的改变幅度并不相同, 且控制效果从壁面到通道内部的逐步增强, 沿宽度方向不同空间位置流场特性的变化为非线性变化. 此外非定常射流控制效果明显的区域对应着标准差分布最大区域, 即通道内压力脉动最大的区域, 脉冲射流主要通过改变分离涡脉动特性达到控制效果, 且沿宽度方向逐步增强对流场的影响, 从而使得主流区内总压损失降低幅度最为明显.

4.3 时间特性分析

在空间特性的基础上, 本文进一步给出了弯曲扩压通道内压力波动的时间特性, 通过分析不同状态下特定位置流体质点的动态压力频谱特性, 可达到分析通道内分离涡的周期性特性变化规律的目的, 因此本文给出了无控、定常射流及几种典型脉冲射流频率控制状态下的压力频谱对比图 (图 7), 该测点位置参考图 6 中第 8 号测点所示.

对比无控及定常射流控制状态下的压力频谱图可知, 无控状态与定常射流控制状态下的压力频谱分布基本一致, 该特征表明定常射流控制状态下测点的周期性特性并未产生明显的变化, 定常射流对流场的拟序特征并未产生明显的影响, 通道内流场仍维持无控状态. 而非定常射流控制状态下, 射流频率对应的频谱幅值有着明显的增加, 测点压力波动受脉冲射流的影响较为明显, 脉冲射流的注入改变了流场的周期性特性. 而当射流频率与通道内分离涡主频一致时, 频谱特性整

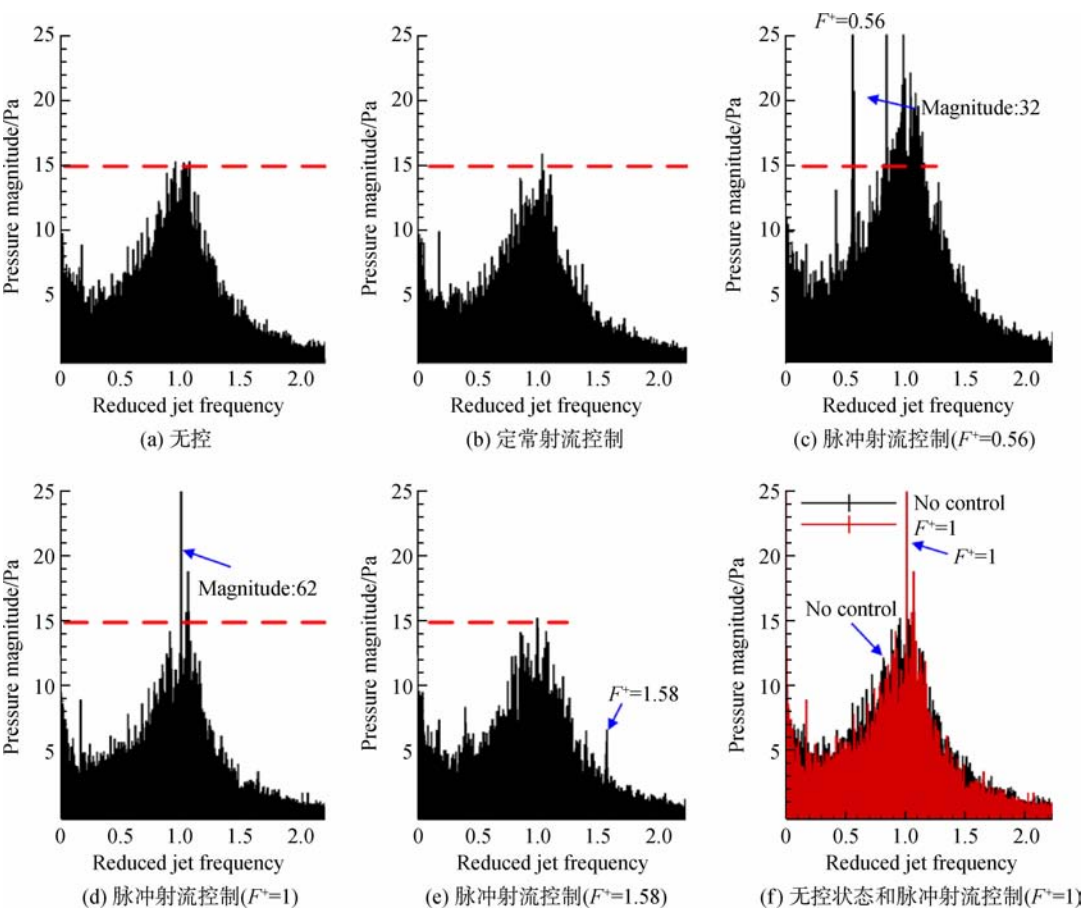


图 7 不同状态下压力频谱对比图

Fig. 7 Comparison of pressure spectrum in different state

体幅值-频率曲线最为陡峭,分离涡主频附近的幅值有着明显的增加,而其余频率对应的压力频谱幅值有着明显的减小,各级频率的总幅值大小较无控状态减小了约 10.7%,测点位置质点的压力波动更为规整有序,如图 7 所示. 该结果表明:在一定频率的脉冲射流作用下,通道内特征分离涡的周期性更为明显,其余频率的涡系结构的压力波动幅度有所降低,该部分涡系结构对流场的影响被脉冲射流所削弱,通道内流场结构较无控、定常射流及其他典型脉冲射流频率控制状态更为有序.

结合不同控制状态下流场的总体、空间及时间特性可知:定常射流控制状态下,注入的“稳定”的射流将使得流场内“不稳定”的旋涡运动趋于“稳定”工作状态,从而达到整体抑制通道内旋涡的运动特性,简化流动特性的目的. 而非定常射流控制状态下,注入的脉冲射流其本身是具有明显周期性的“不稳定”的射流,其对流场的影响主要是通过改变流场内分离涡的脉动时空特性,沿宽度方向逐步增强对流场的影响,此时通道内占主导地位的分

离涡的周期性特性有了明显的改善,

5 结 论

本文结合弯曲扩压通道的脉冲射流总体控制规律,实验测量了通道内某一流向位置沿宽度方向不同位置的静压分布,并在此基础上进行了通道内流场的稳态及动态特性分析,得出如下结论:

- 1) 不同频率的脉冲射流对通道沿程静压分布的影响基本一致,且射流对壁面静压的影响主要集中在射流出口位置,在远离喷口处,射流对通道壁面静压分布基本不再产生明显的影响.
- 2) 定常射流控制状态下,流场内沿宽度方向不同位置流动特性的变化幅度基本相同,定常射流通过整体压制通道内复杂流动、抑制通道内旋涡的运动特性达到整体线性地改变通道内流场特性的效果.
- 3) 在合理脉冲射流控制状态下,脉冲射流对流场的影响主要是通过改变流场内分离涡的脉动时空特性,沿宽度方向逐步增强对流场的影响,从而使得主流区内总压损失降低幅度最为明显,此时弯曲扩压通道内特征分离涡的周期性有了明显

的改善,流场拟序结构更为有序.

参考文献:

[1] Rivir R B,Bons J P,Lake J P. Passive and active control of separation in gas turbines[R]. AIAA-2000-2235,2000.

[2] Hergt A,Meyer R,Engel K. Experimental investigation of flow control in compressor cascades [R]. ASME Paper GT2006-90415,2006.

[3] Gmelin C,Zander V,Huppertz A,et al. Active flow control concepts on a highly loaded subsonic com-pressor cascade; resume of experimental and numerical results[R]. ASME Paper GT2011-46468,2011.

[4] Hecklau M,Wiederhold O,Zander V,et al. Active separation control with pulsed jets in a critically loaded compressor cascade[R]. AIAA-2010-4252,2010.

[5] ZHENG Xinqian,ZHOU Xiaobo,ZHOU Sheng. Investigation on a type of flow control to weaken unsteady separated flows by unsteady excitation in axial flow compressors [J]. Journal of Turbomachinery,2005,127(7):489-496.

[6] ZHENG Xinqian,ZHOU Sheng, LU Yajun, et al. Flow control of annular compressor cascade by synthetic jets [J]. Journal of Turbomachinery,2008,130(2):021018. 1-021018. 7.

[7] 郭明,郑晓宇,周盛,等. BVF 在吹气控制压气机叶栅分离流中的应用[J]. 航空动力学报,2008,23(8):1498-1503. GUO Ming,ZHANG Xiaoyu,ZHOU Sheng,et al. BVF application on blowing control of flow separation of a compressor cascade[J]. Journal of Aerospace Power,2008,23(8):1498-1503. (in Chinese)

[8] Hoeger M,Baier R D,Fischer S,et al. High turning compressor tandem cascade for high subsonic flows;Part 1 aerodynamic design[R]. AIAA-2011-5601,2011.

[9] Müller L,Kožulović D,Wulff D,et al. High turning compressor tandem cascade for high subsonic flows;Part 2 numerical and experimental investigations[R]. AIAA-2011-5602,2011.

[10] Schuler B J,Kerrebrock J L,Merchant A. Experimental in-

vestigation of a transonic aspirated compressor[J]. Journal of Turbomachinery,2005,127(4):340-348.

[11] Greenblatt D,Wygnanski I J. The control of flow separation by periodic excitation[J]. Progress in Aerospace Sciences,2000,36(7):487-545.

[12] Culley D E,Bright M M,Prahst P S,et al. Active flow separation control of a stator vane using embedded injection in a multistage compressor experiment[J]. Journal of Turbomachinery,2004,126(1):24-34.

[13] 黄国平,陈杰,夏晨,等. 抑制压气机叶背分离的无源脉冲射流器:中国,ZL200810195408. 3[P]. 2011-10-30.

[14] 朱剑锋,黄国平,傅鑫,等. 一种控制气流分离的无源微脉冲射流技术研究[J]. 航空学报,2013,34(8):1757-1767. ZHU Jianfeng,HUANG Guoping,FU Xin,et al. Investigation of technology for controlling flow separation by micro-pulsed-jet without external device[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2013,34(8):1757-1767. (in Chinese)

[15] 张攀峰,王晋军,冯立好. 零质量射流技术及其应用研究进展[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,2008,38(3):321-349. ZHANG Panfeng,WANG Jinjun,FENG Lihao. Review on the zero-net-mass-flux jet and the application in separation flow control[J]. Science in China Series E: Technological Sciences,2008,38(3):321-349. (in Chinese)

[16] 朱剑锋,黄国平,傅鑫,等. 无源微脉冲射流抑制叶栅气流分离的初步实验研究[J]. 航空动力学报,2014,29(2):391-397. ZHU Jianfeng,HUANG Guoping,FU Xin,et al. Primary experimental investigation of suppressing flow separation in cascade by pulsed-jet without external device[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(2):391-397. (in Chinese)

[17] ZHU Jianfeng,HUANG Guoping,FU Xin,et al. Use of POD to Elucidate the physics of unsteady micro-pulsed-jet flow for boundary layer flow separation control [R]. ASME Paper GT2013-95266,2013.

(编辑:陈 越)