

文章编号: 1000-8055(2003)03-0336-07

扩压式叶栅非定常分离流机理研究的 频谱分析

陈少龙, 侯安平, 周 盛

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 二维亚音压气机叶栅非定常分离流中旋涡脱落频率的定性研究, 采用数值模拟的方法, 通过九种不同工况下流场中多点总压值的快速傅立叶分析, 初步提出了区分数值振荡和真实物理振荡的判据, 同时得到了这九种工况下非定常分离流中旋涡脱落频率的数值模拟结果。证实非设计工况下, 二维亚音压气机叶栅叶背区出现了较大尺度的开式非定常分离, 分离区自身及分离流影响的尾迹区的主要运动形式可能是周期性的旋涡脱落。

关键词: 航空、航天推进系统; 分离流; 旋涡脱落频率; 频谱分析; 卡门涡街

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

Frequency Domain Analysis of Unsteady Separation Flow in Two Dimensional Subsonic Compressor Cascade

CHEN Shao-long, HOU An-ping, ZHOU Sheng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Numerical simulation was employed for the qualitative research on unsteady vortex shedding frequency in two-dimensional subsonic compressor cascade. Fast Fourier Transform Algorithm was adopted for the value of multi-dots' total pressure in nine different flow conditions. An acceptable criterion is advanced to distinguish the physical oscillation from the numerical oscillation; the vortex shedding frequency in numerical simulation is obtained under the nine different unsteady separated-flow conditions. In non-designed situation, large-dimensional unsteady open separated-flow emerges on the suction surface in two-dimensional subsonic compressor cascade and periodicity vortex shedding might be the primary movement fashion in separated-flow area and wake area dominated by separated-flow.

Key words: aerospace propulsion system; separated-flow; vortex shedding frequency; frequency spectrum analysis; Karmen Vortex-street

1 引言

人类对航空航天技术的追求, 促使了空气动力学理论的飞速发展。而空气动力学理论的每一

次突破, 都带来了航空航天技术水平的极大提高。可是, 现有的任何人造飞行器, 其效率还不如一只小小的昆虫, 究其原因在于目前空气动力学理论的发展, 还没能充分认识和利用非定常流动的潜

收稿日期: 2002-05-27; 修订日期: 2002-09-26

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20000000615)

作者简介: 陈少龙(1977-), 男, 福建莆田人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院硕士生, 主要从事内流分离流的研究。

能^[1]。在轴流压气机中,由于流体粘性和高逆压梯度的共同作用,使得流动一般在叶背发生开式大尺度分离,因而提高发动机的性能的同时,不可避免地遇到了高负荷与高效率不相协调的矛盾。因为分离流动这一问题本身就属于非定常流动的现象,因而,在现有的基于定常假设基础上的设计思想体系中,还不能得到完全的解决,即使现在也引入了一些非定常的措施,如处理机匣等。很自然地,我们想到:能否在进一步了解非定常分离流动机理的基础上,突破现有航空发动机设计思想的局限呢?

分离流在本质上是粘性流动和非粘性流动互相干扰的一类复杂的流动现象。众所周知,在边界层这一薄层内的流体因粘性的阻滞作用而丧失了部分动能,当流体的动能不足以抵抗主流区的逆压强梯度时,就会在壁面附近形成反向流动。所以,人们将壁面摩擦应力等于零(即 $\partial u / \partial y|_{y=0} = 0$)作为判断二维分离的准则^[2]。

在实验研究中,初步得出如下的结论:当翼型处于大攻角的气体绕流时,吸力面上的流体会产生中、大尺度的分离,并且分离流动呈现出复杂的旋涡运动的形式。这种旋涡运动也具有一定的周期性和交错脱落的特点。从现象上看,这种旋涡运动具有类卡门涡街的结构。因此,在大攻角的情况下,翼型绕流可看作钝物体绕流。

在外流方面,对于非定常脱体涡流型的实验研究,初步得出以下的结论:非定常脱体涡流型研究的方向是寻找合适的非定常激发的位置和频率,探索涡层对外界激发的感受性(即最敏感的位置和最有效的激发频率),从而实现涡层演化过程对于特定的外界非定常激发做出最优的响应^[3]。所以,组织流动的原则是:选择适当的激励,使其频率与流动的固有频率相匹配(相等或者成整数倍),通过相互作用发生共振,进而取得整流的效果。主动控制的实验研究也表明:非定常激发源的能耗极弱,其振幅大约仅是主流速度的 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 数量级,能量仅为主流能量的 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 数量级^[4]。

因而,要掌握分离流运动的规律,了解分离流动的频谱特性就是其中很重要的一个环节,故本文首先在这方面展开工作。

2 所用数值程序介绍

(1) 本文数值求解定解域介绍:

其中二维叶栅沿 X 轴向的位置在 $0 \sim$

$\sin 70.12^\circ$ 之间。出于进出口定常边界条件的考虑,定解域在槽道前延伸了一倍弦长,在槽道后延伸了 4 倍弦长。计算过程中, X 向网格结点数取为 220, Y 向网格结点数取为 41。为了更细微的捕捉流场的信息,最多可使 X 向的网格结点加密到 500 个, Y 向的网格结点加密到 200 个。

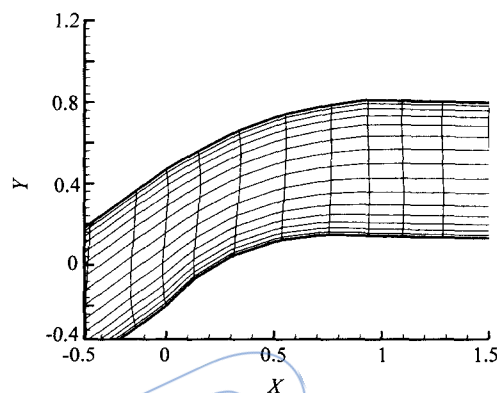


图 1 局部网格图

Fig. 1 local grid chart

(2) 定解条件:

- ① 初始条件是按边界给定的均匀场。
- ② 进口边界给定总压、总温和气流角,压力采用外推获得。
- ③ 出口边界给定静压,其它参数由外推获得。
- ④ 固壁边界根据无滑移和无穿透条件,压力采用法向动量方程求得,其它变量由外推获得。
- ⑤ 在槽道外定解域上下边界上使用周期性边界条件。

(3) 数值计算中采用的收敛准则是:观察程序计算同一工况下,多个点输出的气动参数的变化,如果参数值作准周期性的振荡,则认为求解过程收敛。

3 结果与讨论

3.1 计算内容

在整个工作过程中,总共计算了叶栅流场中三种攻角、三种马赫数,共九种流动情况。计算时,以每一工况下实验测得的进、出口气动参数作为基本条件。采用到的参数有:攻角、进口密度、进口速度、马赫数、雷诺数和出口处大气压。

表 1 给出所用某压气机叶型在二维叶栅的若干参数。

表 1 叶栅几何参数和气动参数
Table 1 Cascade parameter of geometry and aerodynamics

几何和气动参数	数值
弦长 B/m	0.0806
栅距 T/m	0.0538
安装角 $\gamma/(\circ)$	70.12
前缘半径 R_1/m	0.51
后缘半径 R_2/m	0.45
几何进口角 $\beta_{1k}/(\circ)$	48.4
几何出口角 $\beta_{2k}/(\circ)$	91.23

注:这里角度均为与额线的夹角

3.2 计算结果分析

对计算结果与实验结果之间是否吻合,我们进行了验证。在两个结果之间,压力面和吸力面上的走势、极值点的出现,都表现出较好的一致性。因此,从这一点上说,这九种工况下利用该程序计算所得的与时间相关的结果是可信的。

3.3 数据处理过程

(1) 因为本文中判断计算收敛的标准是多点数值模拟的结果是否作准周期振荡。所以,计算所得的每组数据都可以看成是平均值(即定常量)与脉动量的叠加。在进行数据处理时,将各点与时间相关的数据减去其总和的平均值,然后再对该差值进行快速 Fourier 变换分析。图 2 和图 3 是某工况下,流场中一点的总压参数绘制的时域图。

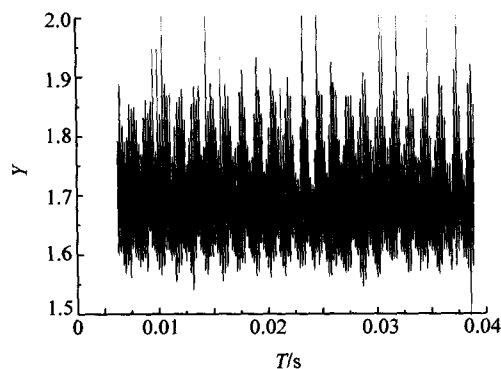


图 2 不减去平均值的时域图

Fig. 2 Value movement with time which doesn't subtract the average

从图 2 和图 3 的对比可见,脉动量除了幅值外,并无其它区别。所以减去平均值并不影响对脉

动量的频域分析。

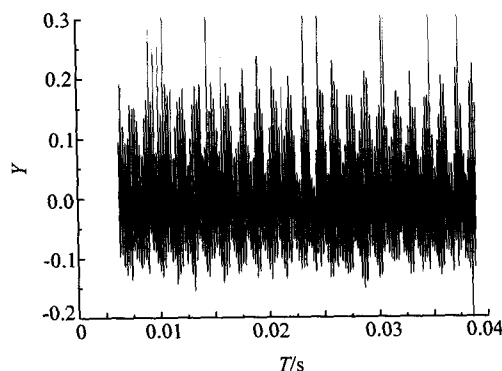


图 3 减去平均值的时域图

Fig. 3 Value movement with time which subtract the average

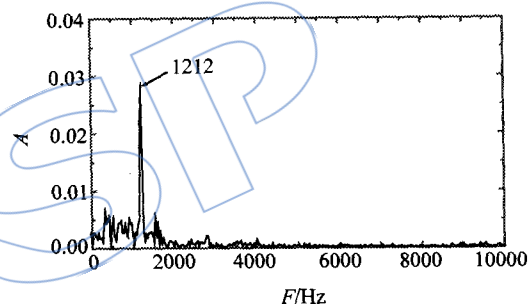


图 4 静压频谱图

Fig. 4 Frequency spectrum of steady pressure

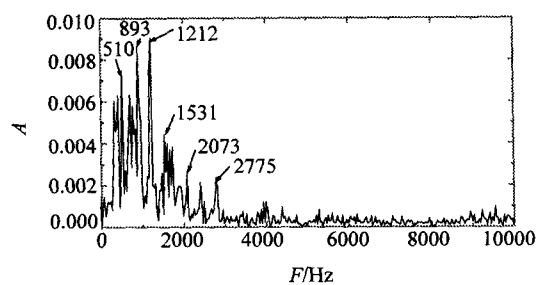


图 5 总压频谱图

Fig. 5 Frequency spectrum of dynamic pressure

(2) 总压与静压频谱的区别

由于本文的目的是探求分离流中旋涡脱落的频率,所以考察在数值模拟中得到的、与时间相关的各点参数值与旋涡之间的关系。通过图 4 和图 5 可知,在同一工况下,静压与总压的频谱图表达了不同的信息。同时考虑到由于总压 P 全面地反映了旋涡运动带来的损失,因此,本文在进行数据处理时,选择了各点的总压值作为快速 Fourier 变

换分析的基本参数。

(3) 为了便于判读频谱图,将每种工况下,各点与时间相关的数据,从无量纲化的时间步长转化为有量纲的时间间隔。这样就可以直接从快速 Fourier 变换得到的频谱图上,读取各个物理意义的频率值,单位为赫兹。

3.4 从工作中总结出的分析频谱图的判据

在得到的众多频谱图中,要判断:哪些个频率值对应于分离流和尾迹中的旋涡脱落频率呢?首先以幅值的大小判断流动现象的强弱,具体指:在一段频率范围内,若某一频率对应的幅值相对高于其它频率,则这一频率就成为待分析的对象。同时,考虑到若在流场的局部区域内得到的频谱图中,存在宽频带、振幅极小且属于同一个量级的振荡,则认为该区域内流动参数的脉动属于数值振荡。在这基础之上,初步拟定了判读频谱图的一个判据。由于本文的内容是在没有相关研究先例的情况下进行的,所以制定的判据是从具体工作中总结出来的。这个判据的内容分为以下五点:

(1) 参照工作中绘制流场瞬时等熵图,在旋涡流动(或者尾迹)的区域内,选择沿周向同一 X 向坐标,不同 Y 向坐标的多点。对照这些点的频谱图。若在这多张图中,均找到某一相同数值的频率和它的倍频,且随着取点靠近旋涡中心,基频的幅值急剧增加;随着取点靠近两涡交替流过的区域,两倍频和基频的相对幅值比增加,则认为该基频为旋涡脱落频率(多张图中,两倍频的误差范围不超过基频的 $\pm 5\%$)。提出这点判据的物理机理是:在旋涡中心流动损失最大,因而其总压频谱图中基频脉动量的幅值最大。而其中对两倍频的规定是因为我们认为在较大攻角下,叶栅的旋涡脱落是类似卡门涡街的不对称结构,位于两涡所夹区域中各点上的参数值在一个周期内,分别受到压力涡和剪切涡的作用。

(2) 参照工作中绘制的瞬时等熵图,在分离区和尾迹区外,特别是在栅前和槽道中,由判据 1 得到的特征频率,对应的幅值衰减得很快,甚至等于零,则可以进一步断定其为旋涡脱落频率。提出这点判据的物理机理是:在流场中,某一点上气动参数在向四周传播时,其振幅是以指数规律衰减的。

(3) 若在整个定解域中,存在这样一个频率(或者是倍频,或者是多个频率)它的振幅较高,且随取点位置的不同(特别是在旋涡流动区域内),振幅在一个数量级上变动,则认为其为数值振荡

频率。这点判据是在前两条判据的基础上,通过运用排除法得出的。

(4) 若某一频率只出现在局部的区域内,由以上原则都无法判断其性质,则将其视为局部数值振荡。提出这点判据的物理机理是:使用波动方程求解过程中,具有较强的椭圆性,所以在某一区域上求得的参数必然影响周围的流域。

(5) 将对若干工况下,与时间连续相关的等熵图进行跟踪捕捉,定性分析旋涡脱落的过程,并粗略计算旋涡脱落频率的范围,以验证前面判据 1 与判据 2 结论的正确性。这点判据的内容将在后面详细给出。

3.5 频谱分析过程

从图 6 可知:该工况下,流动在叶栅吸力面前缘出现明显的分离。在吸力面尾缘前后存在由压力面到吸力面卷起的旋涡和叶背分离剪切层卷起的旋涡。这两个旋涡相互作用,压力涡将剪切涡顶起,从而扩大了分离流的尺度。从瞬时等熵图上也看出,这两个涡在空间上呈交错排列的现象。以下通过频谱图具体分析旋涡脱落的频率。

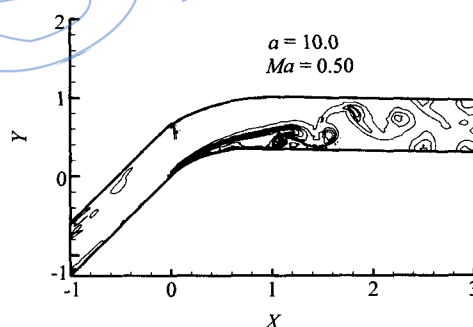


图 6 瞬时等熵图

Fig. 6 Chart of instantaneous entropy

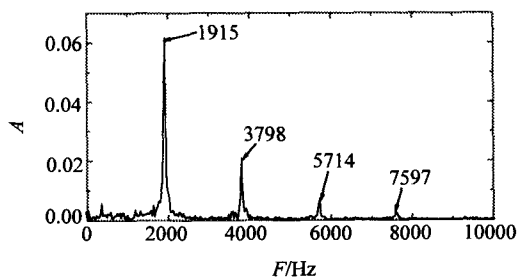


图 7 叶栅出口外较靠近叶背点频谱图

Fig. 7 Frequency spectrum of some spot which stands out of cascade and close-up suction surface

由以上图 7 和图 8 可知:根据判据,推断

1915 Hz 为该工况下的旋涡脱落频率。

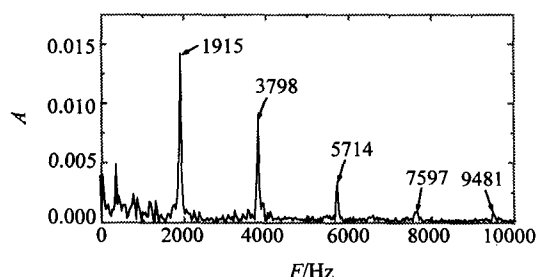


图 8 叶栅出口外较远离叶背点频谱图

Fig. 8 Frequency spectrum of some spot which stands out of cascade and away from suction surface

3.6 验算该工况下结果的可靠性

由于这个判据,是在本文工作的基础上提出的,需要验证其正确性。下面通过在该工况的条件下,连续地截取每间隔 100 个计算步时流场的参数值,绘制流场瞬时等熵图,观察槽道后旋涡的流动情况,计算旋涡的频率范围。如果前面得出的频率处于该范围内,则认为所制定的判据是正确的。(计算步是指:计算从定解域的进口开始,随时间往后推进直到定解域的出口,这个过程就是一个

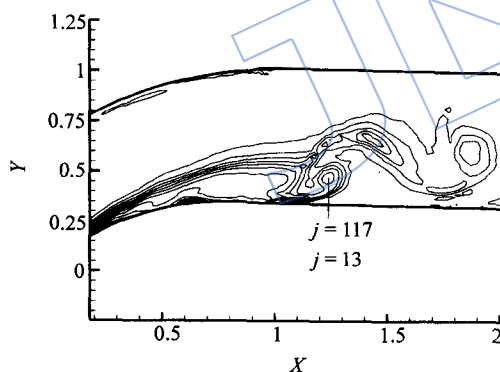


图 9 计算时间步长是:102.8217

Fig. 9 The step of calculative time is 102.8217

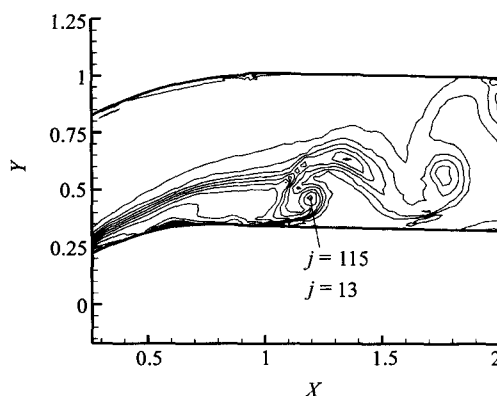


图 10 计算时间步长是:103.7919

Fig. 10 The step of calculative time is 103.7919

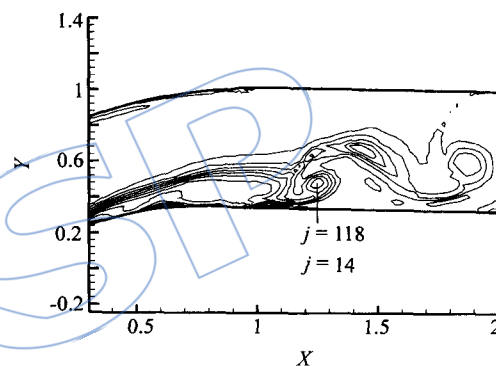


图 11 计算时间步长是:103.9536

Fig. 11 The step of calculative time is 103.9536

计算步)。由于只能每隔 100 个计算步输出单个瞬时结果,所以进行的验算就必然带有误差,因而这里的验算只能起定性分析的目的。

每单位无量纲的时间步长对应的物理时间是: $80.61 \times 10^{-3} / 170.67 \approx 0.472315 \times 10^{-3} \text{ s}$ 。

由瞬时图可知,从图 9 到图 10(或者图 11)正好连续的两个旋涡中心分别流过图 9 所指出的点附近,这样旋涡频率就落在以下两个频率的范围内。通过计算得:

$$\frac{1}{(103.9536 - 102.8217) \times 0.472315 \times 10^{-3}} = 1870.51$$

$$\frac{1}{(103.7919 - 102.8217) \times 0.472315 \times 10^{-3}} = 2182.2625$$

前一小节由频谱图分析得出旋涡频率为 1915 Hz,位于 1870.51~2182.2625 Hz 范围内,从而证明前面制定的判据是正确的。

3.7 分离区和尾迹区流动的物理现象分析

在负攻角、马赫数较小的工况下,叶背分离流

形成的尾迹可能是以大量小涡脱落的形式运动,其运动的频率很高。造成这种流动现象的原因主要有二:第一,流体的运动能量相对较小,在分离区和尾迹区中,可能形成众多的小涡脱落。第二,计算时,网格点取得不是足够的密。下面从同一工

况下绘制的等熵图和频谱图两方面进行分析。

由此等熵图可知: 流场中没有明显的旋涡流动。

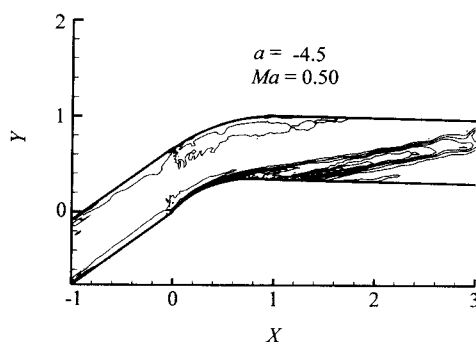


图 12 瞬时等熵图

Fig. 12 Chart of instantaneous entropy

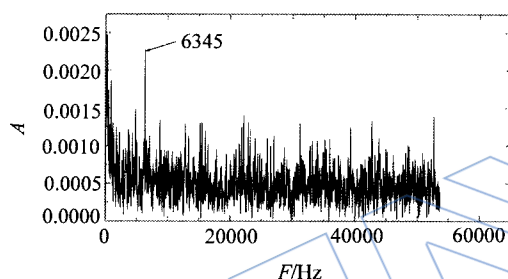


图 13 叶栅出口外紧靠近叶背点频谱图

Fig. 13 Frequency spectrum of some spot which stands out of cascade and adjacent suction surface

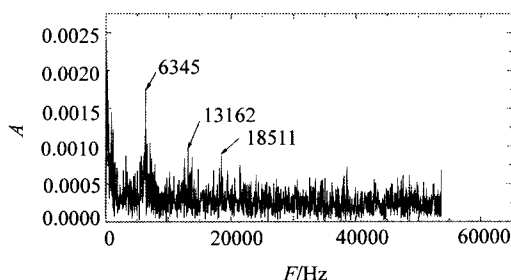


图 14 叶栅出口外较靠近叶背点频谱图

Fig. 14 Frequency spectrum of some spot which stands out of cascade and close-up suction surface

由频谱图可知: 在分离区和尾迹区存在脱落旋涡的运动, 只是从幅值上看旋涡运动对气动参数的影响较弱。这说明在尾迹区中存在着高频周期性运动, 可能是小涡脱落造成的; 同时由于小涡的振幅即能量太小, 在尾迹中合并的趋势小于耗散的趋势, 所以看不到明显的旋涡流动现象。目前

推论: 小涡运动并非具有类卡门涡街的结构形式。众多的小涡的频率可能分布在较宽的范围内, 振幅差异相对平缓, 使得某一频率的旋涡在其涡量强度下无法将其它频率的旋涡卷进去, 因而不能形成类卡门涡街的结构。

在攻角较大、马赫数较高的工况下, 叶背分离区和尾迹区主要是以较明显的类卡门涡街的周期性旋涡交错脱落的形式运动, 其运动的频率相对较低。这一点由前两节可以看出。

4 结 论

(1) 在工作的基础上初步提出二维叶栅分离流频谱图分析的判据, 并验证了该判据的正确性; 同时得到各工况下数值模拟的旋涡脱落频率。

表 2 各工况旋涡脱落频率

Table 2 Vortex shedding frequency of all kinds of status

攻角 $\alpha/(^{\circ})$	马赫数	频谱分析结果 (F/Hz)
-4.5	0.5	小涡, 6345
	0.7	小涡演化为大涡, 频率: 4419
	0.8	频率: 4547
3	0.5	频率: 2960
	0.7	频率: 3681
	0.8	频率: 3977
10	0.5	频率: 1915
	0.7	频率: 2492
	0.8	频率: 2807

(2) 对于分离流和尾迹区中旋涡脱落频率可以作如下的推论: 当脱落的旋涡呈现出类卡门涡街的结构时, 在同一攻角下, 旋涡脱落的频率与马赫数有关, 马赫数越大, 旋涡脱落频率越高; 而在相近的马赫数下, 旋涡脱落的频率与攻角也有关, 攻角越大, 旋涡脱落频率越小。

(3) 在负攻角、马赫数较小的工况下, 叶背分离流形成的尾迹可能是以大量小涡脱落的形式运动, 其运动的频率很高, 小涡运动并非具有类卡门涡街的结构形式; 在攻角较大、马赫数较高的工况下, 叶背分离区和分离区影响尾迹区主要是以类卡门涡街的形式运动。

因此, 由平面叶栅的数值模拟可以推断: 风扇/压气机系统内叶栅流动在非设计工况下, 叶背出

现了较大尺度的分离,分离影响的尾迹区及分离区自身的主要运动形式可能是周期性的旋涡脱落,这为我们进一步实施流动控制提供了一个基础性认识。

参考文献:

[1] 季路成. 轴流叶轮机转子/静子干扰非定常流动探索[D]. 北

京:北京航空航天大学,1998.

[2] 夏雪滢,邓学莹. 工程分离流动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1991.

[3] 任汝根,周盛. 叶轮机械的非定常流动[J]. 燃气涡轮实验与研究,1991,4(4):1-24.

[4] 刘景梅,周盛. 叶轮机械新流型探索[J]. 航空动力学报,1995,10(3):205-20.

JALSP