

文章编号: 1000-8055(2005) 02-0267-06

三维扩压叶栅非定常流动机理研究的频谱分析

吴鸿斌, 郑新前, 周 盛

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力国防科技重点实验室, 北京 100083)

摘要: 计算了三维直叶栅在不同攻角、不同马赫数下的流动情况, 得到流场的非定常解, 并进行了频谱分析, 对叶栅非定常流动的流场结构和流动机理做了初步的探讨。分析计算结果表明: 在来流均匀, 定常边界条件下, 叶栅内流动仍然表现出强烈的非定常性。分离区和尾迹中的流动, 以旋涡的有规律周期性脱落为主要的运动形式。旋涡脱落的频率, 随着攻角和马赫数的变化而变化: 同马赫数下, 攻角越大, 频率越低; 同攻角下, 马赫数越高, 频率越高。同时, 在同一工况下, 旋涡频率沿叶高呈非均匀分布, 叶中区域频率相对低, 靠近端壁区频率相对高。

关键词: 航空、航天推进系统; 轴流压气机; 三维叶栅; 非定常流动; 分离流; 旋涡脱落频率

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Frequency Analysis of Three Dimensional Compressor Cascade Unsteady Flow Mechanism Research

WU Hong-bin, ZHENG Xin-qian, ZHOU Sheng

(National Key Laboratory of Aircraft Engine,

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

Abstract: A simulation using unsteady Reynolds-averaged viscous turbulent equations was carried out. The results show that the flow in the separation region and wake region is characterized as periodic or quasi-periodic vortex shedding and the frequency of vortex shedding is varied with incidence and Mach number. At same Mach number, the frequency of vortex shedding decreases with the increase of incidence. Yet, the frequency increases with the increase of Mach number keeping incidence unchanged. In the same situation, the frequency of vortex shedding differs along the span of the cascades. The frequency is lower at the middle of the span than that at the hub.

Key words: aerospace propulsion system; axial flow compressor; 3D cascade; unsteady flow; flow separation; frequency of vortex shedding

在发动机设计中, 高的推重比与高的效率是人们不断追求的目标。在不增加压气机级数的前提下不断提高压气机的压比是实现这个目标的重要手

段。这样, 高的级压比使得压气机叶片要在很高的逆压梯度下工作, 在粘性和高逆压梯度的影响下, 压气机中叶片将很容易发生大尺度的分离流动, 呈

收稿日期: 2004- 05- 30; 修订日期: 2004- 09- 09

作者简介: 吴鸿斌(1979-), 男, 广西玉林人, 北京航空航天大学航空发动机气动热力国家级重点实验室硕士生, 主要从事内流非

定常分离流研究。© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

现强烈的非定常性^[1,2]。

已有的风洞实验成功地捕捉到了二维叶栅中叶片尾迹的漩涡脱落状况。二维数值模拟计算也预测了尾迹中漩涡的存在^[3~6]。在叶片表面上产生的分离区的流动以旋涡有规律脱落为主要的运动形式,而旋涡脱落的形式又与尾迹引起的损失有很密切的关系。因此,要减少分离流带来的危害,探讨对分离流的主、被动控制手段,就必须对叶片表面分离流中旋涡脱落的规律进行进一步的研究和探讨。

1 所用数值程序介绍

本文所利用的程序为三维有粘非定常CFD程序。采用三阶无波动NND3格式^[7]捕捉到了分离涡产生与脱落过程,并合理地反映了紊流流动特征。所采用的双时间推进^[8,9](dual time-step)及LU-SGS^[10]算法保证了三维计算比较快速地推进。由于Baldwin-Lomax 湍流模型相对比较简单,它被广泛应用于内流计算并有大量算例证明它是比较可靠的。B-L模型采用涡分布而不是速度梯度来确定尺度因子,可避免计算边界层厚度,不仅适用于边界层的计算,还适用于N-S方程的计算;由于对外层的改进,B-L模型还适用于具有小分离泡的流动计算。

所用某压气机叶型的若干参数如下:

- 弦长 $b=80.6\text{ mm}$;
 - 展长 $c=160.0\text{ mm}$;
 - 栅距 $t=53.8\text{ mm}$;
 - 稠度 $b/t=1.5$;
 - 展弦比 $c/b=1.985$;
 - 安装角 $\gamma=19.9^\circ$;
 - 叶片前缘构造角 $\beta_{lk}=41.6^\circ$;
 - 叶片后缘构造角 $\beta_{lk}=-1.2^\circ$;
 - 叶型前缘半径 $r_1=0.50\text{ mm}$;
 - 叶型后缘半径 $r_2=0.45\text{ mm}$ 。
- 其中各角度为与轴向夹角。

1.1 数值求解的定解条件

研究所用叶栅由上面提及叶型叶片组成,生成H型叶栅三维计算网格如图1所示,网格数为 $81\times 31\times 337$ (切向 $I\times$ 径向 $J\times$ 轴向 K)。H型网格能够较好的与流动方向保持一致,而且容易在叶栅通道内进行网格划分,在网格上下游边界处容易施加边界条件。另外,H型网格容易实现周期性分布。计算域栅前1倍弦长,栅后3倍弦长,计算域高度则根据叶栅高度而定。

1.2 数值求解的定解条件

在进口:给定总温 T^* ,总压 P^* 和切向气流

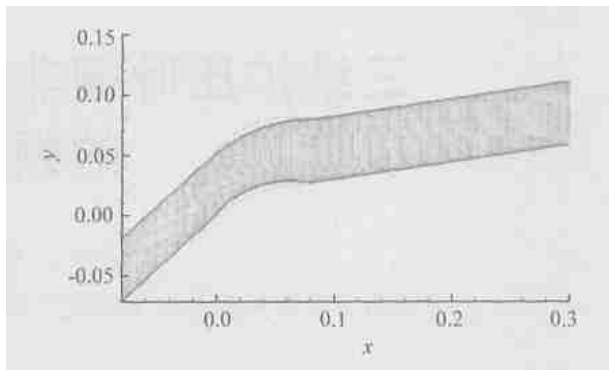


图1 S_1 流面计算网格示意图

Fig. 1 Mesh of S_1 stream surface for computation

进气角 β_1 ;出口:给定出口反压 P ,其他参数由内点轴向外插确定。在物面上,对于粘性流场,采用无滑移条件,即 $u=0, v=0, w=0$ 。周期性边界上,使用周期性条件。另外初始条件按边界条件给定均匀场。

2 计算结果和讨论

2.1 计算内容

整个工作过程计算了3个马赫数,5个攻角下的其中11种工况。

- $Ma=0.50$, $i=3^\circ, 6^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$;
- $Ma=0.60$, $i=3^\circ, 6^\circ, 10^\circ$;
- $Ma=0.80$, $i=3^\circ, 6^\circ, 10^\circ$ 。

2.2 数据分析过程

由于总压 P^* 全面地反映了旋涡运动带来的损失,因此,选择流场中各参考点的总压值作为快速Fourier变换分析的基本参数。陈少龙,侯安平等在文献[6]中初步提出了区分数值振荡和真实物理振荡的判据。这里也借鉴相关措施判定每个工况的涡脱落特征频率。在下面给出的时域和频谱示意图,其总压测量点均位于叶栅后叶片尾缘尾迹区内。

在得到的众多频谱图中,主要以幅值的大小判断分离流和尾迹中的漩涡脱落频率。首先,幅值的大小代表了流动中总压脉动强度的大小。即在一个某宽度的频率范围内,如果有某一个或几个频率对应的幅值明显地高于其他频率所对应的幅值,那么就可以将这—个或几个频率视为待分析对象,这样的高振幅幅值的频率很有可能对应了流场中总压的有规律脉动状况。同时,在流场中的

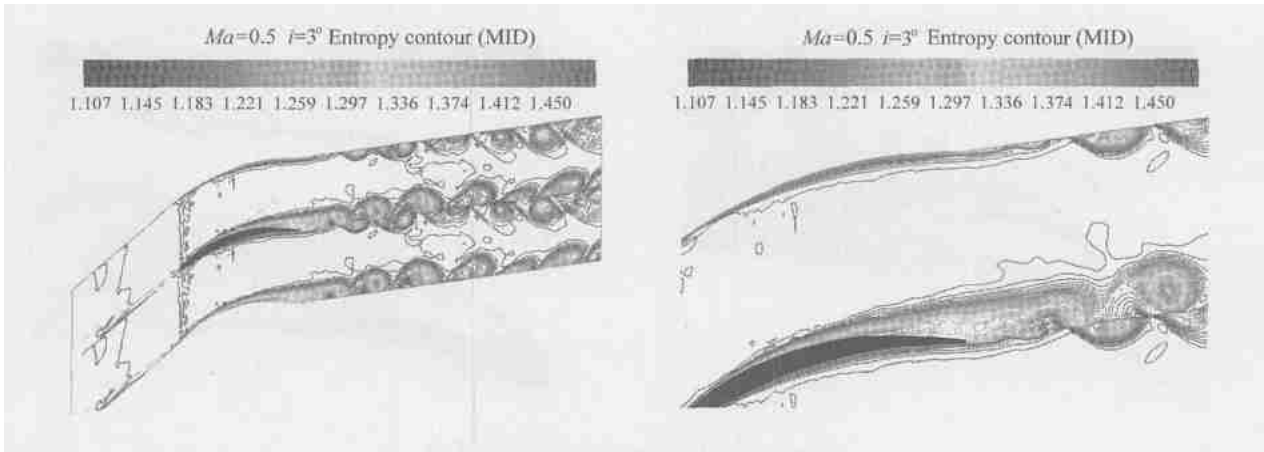


图 2 $Ma=0.5, i=3^\circ$ 工况流场瞬时等熵线分布图

Fig. 2 Instantaneous entropy contours at $Ma=0.5, i=3^\circ$

一些局部区域内, 如果对于各点的气动参数频谱分析图中, 都没有明显的对应着高幅值的频率值出现, 而只存在等数量级的小幅值、宽频带的振荡, 那么可以认为该区域内, 流动参数的脉动属于程序计算过程的数值振荡; 或者该区域内可能在物理意义上就不存在明显的有规律的总压脉动情况。

由于漩涡运动会产生熵增, 从流场中熵的瞬时分布, 可以看到漩涡的特征。所以从时间推进的等熵图上可以清晰地看到非定常流场的发展和漩涡结构, 以及气流的分离情况和涡的生成、脱落、运动及消亡过程。

2.3 不同工况分析结果

$Ma=0.5$, 攻角 $i=3^\circ$ 工况下, 从图2 可以看到, 在叶背的尾缘附面层增厚, 出现小分离, 在流出叶栅通道后出现了旋涡的脱落, 叶背和叶盆有规律地依次脱落出一对旋涡来, 交错排列流向下游。旋涡在流向下游的过程中, 强度不断减弱, 最后与主流区掺混, 消亡。这些从尾部脱落出来的旋涡, 强度不大, 视为尾迹的小涡运动; 小涡运动并非具有类卡门涡街的结构形式。

通过频谱分析来判断涡脱落频率(图3), 可以找出该工况下, 旋涡脱落的频率为4 150 Hz。

$Ma=0.5$, 攻角 $i=10^\circ$ 工况下, 通过(图4) 频谱分析来判断涡脱落频率, 可以找出该工况下, 旋涡脱落的频率为1 953 Hz。从图5 的瞬时等熵图可以看出, 大攻角下, 气流在叶背中部就开始分离, 相伴出现较大尺度的剪切分离涡, 并且到尾缘附近, 还出现了局部倒流现象。栅距方向的逆压梯度驱使气流从压力面绕过尾缘流向吸力面, 因此就同时存在着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2 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。从熵图上也可看出, 2 个涡呈交错排列的现象。

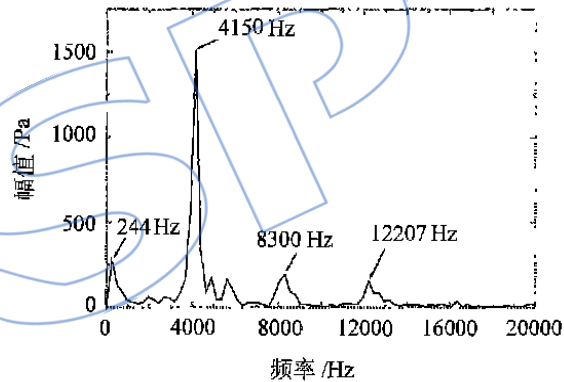


图3 $Ma=0.5, i=3^\circ$ 工况尾迹区总压频谱分析图

Fig. 3 Spectrum graph of total pressure at $Ma=0.5, i=3^\circ$

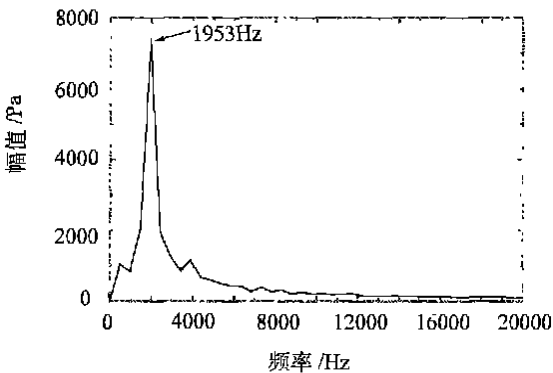


图4 $Ma=0.5, i=10^\circ$ 工况尾迹区总压频谱分析图

Fig. 4 Spectrum graph of total pressure at $Ma=0.5, i=10^\circ$

在大攻角情况下, 叶背分离严重, 分离区中的

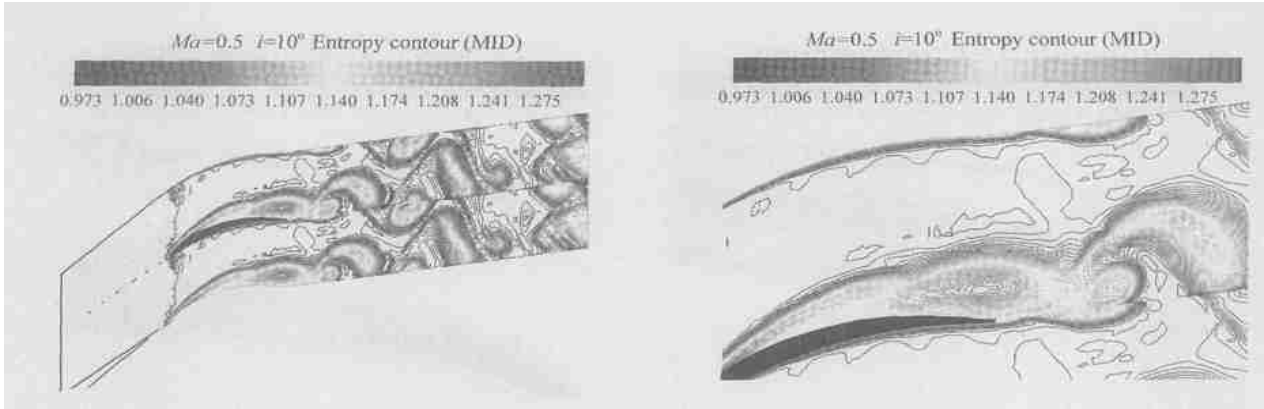


图5 $Ma=0.5, i=10^\circ$ 工况瞬时等熵图

Fig. 5 Instantaneous entropy contours at $Ma=0.5, i=10^\circ$

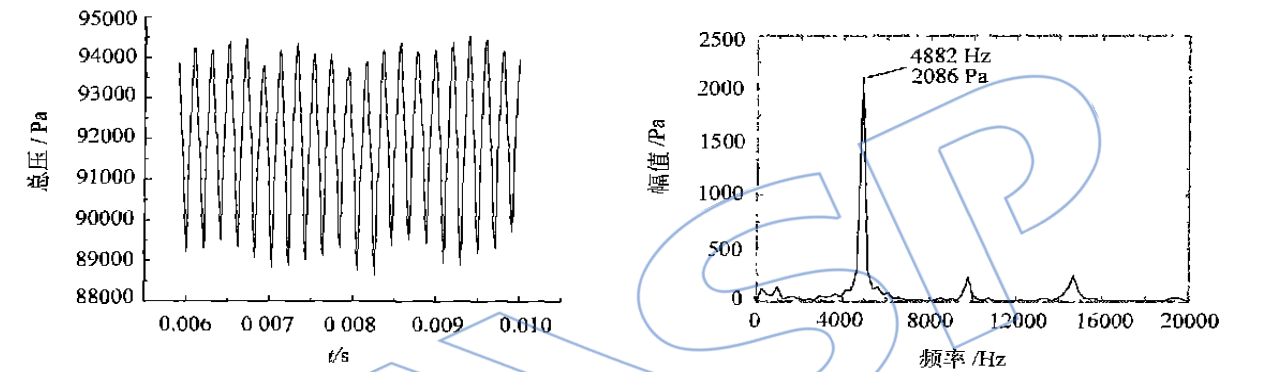


图6 叶中位置的时域图和频谱分析图

Fig. 6 Time domain and spectrum graph of at the middle of the span

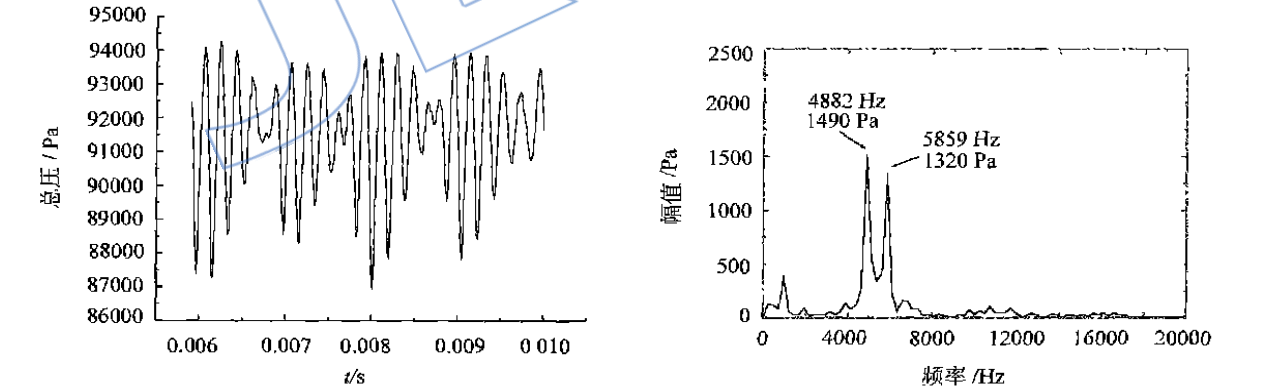


图7 $1/4$ 叶高的时域图和频谱分析图

Fig. 7 $1/4$ length of the span

压力显著低于主流区和叶盆处的压力,在强逆压梯度的作用下,卷起了交错的2个旋涡。这些大涡在叶栅内就发展得都比较充分,在向下游流动的过程中,掺混耗散较快。

2.4 同工况不同叶高位置频谱分析结果

三维数值模拟较之二维来说,较真实的反映了

流场的三维流动情况,端壁区的流动还会受到两个壁面的影响。由于流场沿叶高方向的对称性,这里只给出叶中向一个叶端的结果。以 $Ma=0.6, i=3^\circ$ 工况为例分析旋涡脱落频率沿叶高上的变化情况,如图6~图8所示。

如图6所示,叶中位置的频谱分析得出叶中

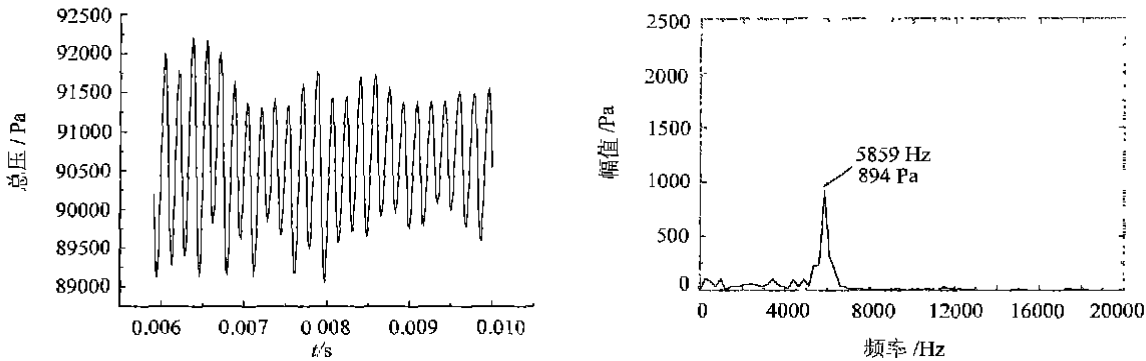


图 8 叶根附近的时域图和频谱分析图

Fig. 8 Time domain and spectrum graph of at the hub of the span

部主流区特征频率4 882 Hz。
如图7所示,在1/4叶高处,频谱分析出两个高幅值特征频率,分别4 882 Hz 以及5 859 Hz。
如图8所示,叶片端部附近,涡脱落频率清楚地分析为单一的5 859 Hz。

表1 11个工况下的尾缘涡脱落频率

Table 1 Characteristic frequency of trailing edge vortex shedding at 11 different cases

马赫数 <i>Ma</i>	攻角 <i>i/(°)</i>	频谱分析结果	
		主流区/Hz	叶根(尖端)壁区/Hz
0.5	3	4 150	4 883
	6	3 174	4 150
	10	1 953	3 418
	15	1 221	1 953
	15	1 221	1 953
0.6	10	4 883	5 859
	15	4 639	5 127
	20	2 197	3 906
0.8	3	7 446	8 545
	6	6 592	7 324
	10	3 662	—

从主流区到两个端壁(对称的),频率发生了变化。看总压的时域图可以发现(见图6~图8),总压的时间相关脉动图在叶中和叶根(尖)不同,并且在1/4(和3/4)叶高处还发现两个脉动的叠加效果。在频谱分析图上很清楚地看到了频率从

叶中到叶端区的变化:在叶中主流区内为4 882 Hz;到1/4(和3/4)叶高处分析出同时存在的4 882 Hz和5 859 Hz;到端区又变成了单一的5 859 Hz。
对其他工况的计算结果进行同样的分析,得到了相近的结果。

从计算得到的结果来看,从中心区到端壁区,旋涡脱落的频率是不一样的。相对一个工况内来说,叶中流动情况较好,频率低;靠近端壁区的流动由于有壁面的影响,附面层较厚,紊乱程度更大些,流动较复杂,比如可能存在(还可能同时存在)马蹄涡、角涡等复杂轴向涡系^[11]运动,造成涡比较破碎,分析出的频率相对主流区高,但是,能量耗散较多,总压脉动振幅相对要小些。最后,把各工况频谱分析结果列入表1。

3 结 论

通过对不同攻角,不同来流马赫数工况的三维压气机直叶栅数值模拟计算和分析,可以得到下面的结论:

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;在相同、相近的马赫数下,旋涡脱落的频率与攻角有关,攻角越大,旋涡脱落频率越小;但是,在攻角很大的情况下,旋涡脱落频率对攻角的变化不敏感。

另外,从本文的数值模拟计算结果还可以看到,旋涡的脱落频率沿着叶高方向并不是均匀分布的,叶片端部附近流动受端壁区的影响,流动比较复杂,涡的脱落频率相对地高于叶中主流区。但是,端壁区分析出的特征频率,其随攻角、马赫数的变化规律,与主流区的规律相同。

参考文献:

- [1] 任汝根,周盛. 叶轮机械中的非定常流动[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1991, 4(4): 1~24.
- [2] 孟庆国,周盛. 叶轮机械非定常流动研究进展[J]. 力学进展, 1997, 27(2): 232~246.
- Meng Qingguo, Zhou Sheng. Advances in the Study of Unsteady Aerodynamics in Turbomachinery [J]. *Advances in Mechanics*, 1997, 27(2): 232~246.
- [3] Wu J M, Lu X Y, Andrew G Denny, et al. Post-Stall Flow Control on an Airfoil By Local Unsteady Forcing. Part I: Lift, Drag, and Pressure Characteristics [R]. 1997, *AIAA Paper* 97- 2063.
- [4] Wu J Z, Lu X Y, Wu J M. Post-Stall Flow Control on an Airfoil By Local Unsteady Forcing. Part II: Mode Competition and Vortex Dynamics [R]. 1997, *AIAA Paper* 97- 2064.
- [5] 张文龙,袁巍,张键,等. 压气机二维叶栅涡脱落的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 556~560.
- ZHANG Wen-long, YUAN Wei, ZHANG Jian. Numerical Simulation of Trailing Edge Vortex Shedding in a 2-D Compressor Cascade [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(5): 556~560.
- [6] 陈少龙,侯安平,周盛. 扩压式叶栅非定常分离流机理研究的频谱分析[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 336~342.
- CHEN Shao-long, Hou An-ping, ZHOU Sheng. Frequency Domain Analysis of Unsteady Separation Flow in Two Dimensional Subsonic Compressor Cascade [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 18(3): 336~342.
- [7] 张涵信,李沁,庄逢甘. 关于建立高阶差分格式的问题[J]. 空气动力学报, 1998, 6(1): 14~23.
- Zhang Hanxin, Li Q in, Zhuang Fenggan. On the Construction of High Order Difference Schemes [J]. *ACTA Aerodynamic Sinica*, 1998, 6(1): 14~23.
- [8] Jameson A. Time Dependent Calculations Using Multi-Grid with Applications to Unsteady Flows Past Airfoils and Wings [R]. *AIAA Paper* 91- 1596.
- [9] 刘前智,周新海,胡运聪. 轴流叶轮机三维粘性非定常流动计算的双时间方法[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(增): 22~24.
- Liu Qian-Zhi, Zhou Xin-Hai, Hu Yun-Cong. Dual Time-Stepping for Computation of 3D Unsteady Viscous Flow Through Axial Flow Turbomachinery [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001, 22(Suppl.): 22~24.
- [10] Yoon S, Jameson A. Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equations [J]. *AIAA Journal*, 1988, 26: 1025- 1026.
- [11] Liu H X, Liu B J, Li L. Effect of Leading-Edge Geometry on Separation Bubble on a Compressor Blade [J]. *ASME Journal*, GT 2003- 38217.