

文章编号:1000-8055(2009)11-2564-06

动叶弯和掠对压气机效率非定常波动的影响

毛明明¹, 宋彦萍², 王仲奇²

(1. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 淄博 255049;

2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 对一单级跨声压气机设计工况下采用了 3 种弯、掠动叶后的非定常流场分别进行了数值模拟, 分析了动叶弯、掠对级效率非定常波动的影响。研究表明:非定常计算条件下,动叶弯、掠后的压气机效率仍然获得大幅提高,并且效率的波动幅值同原型压气机相比明显降低,同时动叶改型前后的效率和压比的非定常波动曲线的相位发生了偏差;弯、掠动叶降低了压气机顶部和根部的分离损失,也使根部和顶部的效率波动显著降低。

关 键 词: 跨声压气机; 非定常; 弯; 掠; 效率

中图分类号: V231

文献标识码: A

Effect of bowed and swept rotors on the unsteady efficiency fluctuation of a transonic compressor

MAO Ming-ming¹, SONG Yan-ping², WANG Zhong-qi²

(1. School of Transportation and Vehicle Engineering,

Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. School of Energy Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The unsteady 3-D flow fields in a transonic compressor at design point were simulated numerically to study the effects of the swept and bowed rotors on the stage efficiency fluctuation. The results show that, as compared to the baseline, the time-averaged efficiency of the compressor with bowed and swept rotors is increased remarkably, and the amplitude of the efficiency fluctuation is obviously reduced. And the phases of the stage efficiency fluctuation waves in time are shifted. The bowed and swept rotors reduce the separation loss of hub and tip region and also lower the efficiency fluctuation amplitude thereto.

Key words: transonic compressor; unsteady; bow; sweep; efficiency

经过近半个世纪的发展,弯、掠叶片技术作为控制端壁二次流和激波的重要手段,已经在压气机和风扇的提高效率和扩稳方面获得广泛应用,并且国内外的研究学者已在数值和实验研究方面取得了一定的成果。Denton 和 L. Xu^[1]对一跨声风扇进行了前、后掠和正、反倾的研究。结果表明,倾斜和掠对跨声风扇效率和压比影响很小,但对

失速点的影响很大,尤其前掠明显提高了失速裕度。Beini 等人^[2]以 Rotor 37 为原型动叶对其进行了轴向掠和周向倾斜的改型研究,结果发现轴向后掠和周向正倾斜都可以使激波向下游倾斜,从而减小激波损失。哈尔滨工业大学的王仲奇院士及其课题组 90 年代开始了弯曲扩压叶栅的研究,取得了许多研究成果^[3-6]。但由于各学者所采

收稿日期:2009-03-03; 修订日期:2009-05-18

基金项目:国家自然科学基金(50646021)

作者简介:毛明明(1981-),女,山东肥城人,讲师,博士,从事叶轮机械内气体动力学研究。

用的叶型不同,工况条件也不一样,因此得到的结果并不完全统一。

同时近年来的研究发现,叶栅内部的非定常流动对压气机气动、结构强度性能存在不可忽视的影响。国外从 20 世纪 80 年代就开始了对非定常流动的研究,由单级逐渐发展到多级。Halstead^[7]在一台大尺寸的压气机和低压透平上的实验研究揭示了尾迹通过的基本效应:当尾迹掠过叶片表面的时候转捩就会开始,层流分离泡被抑制和“平静区”的存在。Gorrell 等人^[8]应用了 DPIV(digital particle image velocimetry)测量发现,当导叶与动叶间的距离变近时,导叶尾缘处的涡受到下游由弓形激波的影响,会从尾缘脱落。如果此间距进一步减小,导叶尾缘脱落涡的尺寸和强度会增加,从而产生更多的损失。国内在这一领域的研究也已开始,西工大的刘前智^[9-10]在跨声速压气机非定常数值模拟方面做了大量卓有成效的工作,北航的陈懋章院士发展了一种研究叶轮机内动、静叶间的相互作用的新方法——扰动涡方法^[11],周盛教授^[12]首次提出了将叶轮机非定常干扰时间平均效应纳入设计体系,实现所谓的准四维设计体系。

本文研究的算例为一国内目前在用的小涵道比涡扇发动机高压轴流段的跨声压气机,这种压气机的面积小,增压比和效率都较高,已广泛应用于燃气涡轮发动机中。鉴于目前叶片弯掠在非定常条件下对邻近叶栅内流动状况、级效率影响的实验与数值研究还不多见,本文借助于数值模拟手段研究了此跨声压气机的动叶弯、掠对级效率非定常波动的影响,并对级效率非定常波动的流动机理做了初步研究。

1 压气机参数与数值模拟方法

1.1 计算模型简介

本文研究的单级跨声压气机动叶叶片数为 21,静叶叶片数为 24,内径为 40 mm,外径为 75 mm,中径处动、静叶弦长分别为 21 mm 和 25 mm,动叶叶顶间隙为 0.3 mm,动叶设计转速为 42 000 r/min,设计级总压比和级效率分别为 1.2 和 81%,设计点流量为 2.43 kg/s。弯掠动叶(BSW)、正弯动叶(BDF)和前掠动叶(SWF)是在原型扭动叶(ORI)的基础上各自进行了弯、掠设计。通过参数化研究,BDF 和 SWF 的几何参数选取弯、掠高为 40% 叶高和弯、掠角分别为 20° 和 15°,对 BSW 作了正

弯和前掠相结合的设计,具体的设计过程以及弯掠动叶流场内的详细损失分布见文献[6]。

1.2 求解程序

本文数值计算采用的程序 FINE™/TURBO 流场求解器是由 NUMECA 公司的 Hirsch 等人开发的商业软件,差分格式采用二阶迎风格式辅以矢量通量分裂算法,四阶 Runge-Kutta 法迭代求解。为了加速收敛,计算使用了多重网格技术,湍流模型采用一方程 Spalart-Allmaras 模型。

1.3 计算网格及边界条件

本文对整级所采用的网格为 H-O-H 多块的结构化网格,由 Numeca/AutoGrid 生成。4 种计算模型采用相同的网格分布和边界条件。图 1 给出了网格图,计算整级的网格数为 618 190,用以控制壁面网格密度的 y^+ 为 1.2。进口轴向进气,总温 288 K,总压 101 325 Pa,出口给定中径处静压,采用完全径向平衡方程。叶片表面和固壁均采用无滑移边界条件和绝热壁面条件。

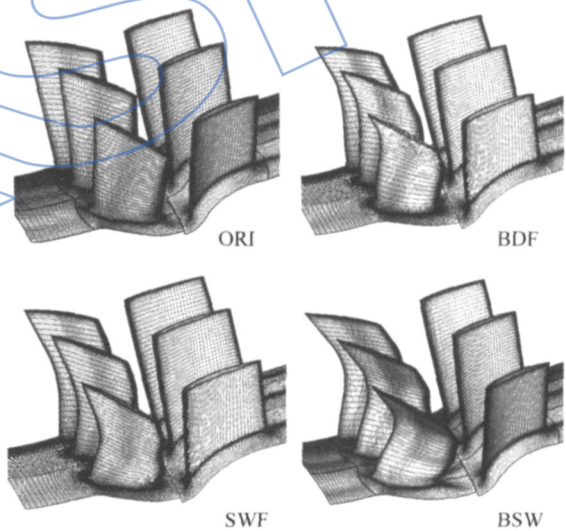


图 1 网格示意图

Fig.1 Computational grids

1.4 非定常计算参数设定

在非定常数值模拟中,引入双重时间步方法,非定常计算采用 Domain Scaling 方法进行了单通道计算,动叶的网格位置随着物理时间步而变化。一个栅距通道内设定 30 个物理时间步,分别对应 30 个不同的动叶周向位置(相对于静叶)。动静叶交界面处信息传递采用超限插值方法。Domain Scaling 方法要求上下游叶片的计算域周向尺寸相同。为了保证最小的计算量并满足 Domain

Scaling 方法的要求, 本文将静叶数由 24 片改为 21 片并将其弦长放大保证稠度不变.

2 计算结果分析

2.1 级效率的非定常波动

在研究压气机级性能参数的非定常波动时, 选择了弯、掠动叶压气机和原型压气机的设计工况点作为非定常计算点进行比较, 表 1 中所示为非定常计算得到的 4 种压气机性能参数的时均值及波动值的对比. 可见, 非定常流动条件下弯、掠动叶压气机的效率与原型压气机相比仍然得到了很大的提高, 其中弯掠动叶压气机 (BSW) 的时均效率提高最多, 这与定常计算的结果^[6]相吻合. 并且还可以看到, 3 种弯、掠动叶压气机的效率波动幅度与原型相比均有降低, 尤其是弯掠动叶压气机 (BSW) 的效率波动幅度降低最多. 3 种弯、掠动叶使压气机效率波动幅度降低的程度与其时均效率提高的程度也是相对应的, 时均效率提高的越多, 波动的幅度降低的越多, 这是因为弯、掠动叶出口减小了上、下端壁的损失^[6], 使损失沿径向分布更为均匀, 从而增加了下游静叶径向进口条件的均匀性.

表 1 应用 4 种动叶的压气机的时均效率和波动值

Table 1 Time-averaged value and unsteady fluctuation amplitude of compressor efficiency with different rotors

	η	$(\Delta\eta/\eta)/\%$
ORI	0.78648	3.88
BDF	0.79997	3.27
SWF	0.79669	3.48
BSW	0.80914	2.97

非定常计算得到的级效率随时间的波动规律如图 2 所示. 图 2 中的 4 种压气机模型级效率的周期性的波动曲线都存在着相位差, 这是因为弯、掠动叶出口的尾迹以及势流的相位与原型动叶相比都发生了改变, 而静叶下游出口流场受到上游动、静叶尾迹以及势流相叠加的影响, 也就使压气机出口的压力和温度场的周向相位都发生了变化, 导致最终效率曲线的相位也发生了改变.

图 3 所示为 4 种压气机模型的时均效率的节距平均值沿径向的分布, 从图中可以看到 3 种弯、掠动叶压气机与原型压气机相比都使顶部约 30% 叶高范围内的效率明显提高. 结合图 4 中 4 种动叶吸力面的相对马赫数等值线图可以看到,

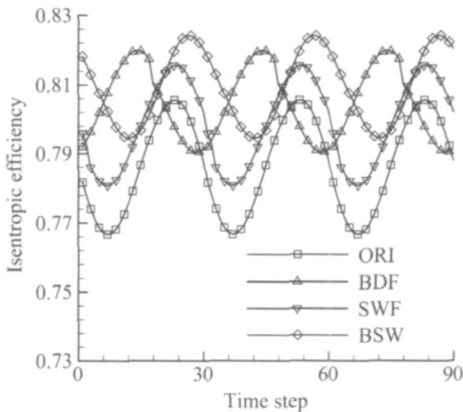


图 2 压气机效率的非定常波动

Fig. 2 Unsteady fluctuation of compressor efficiency

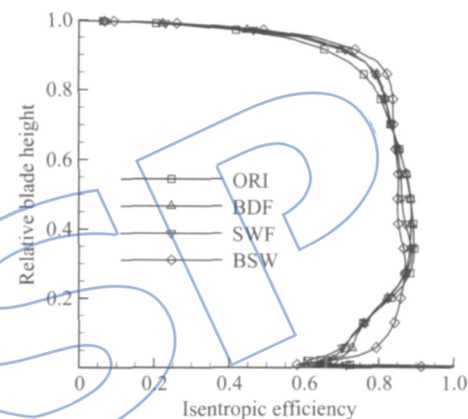


图 3 时均效率的节距平均值径向分布

Fig. 3 Radial distributions of time-averaged efficiency by pitch averaging

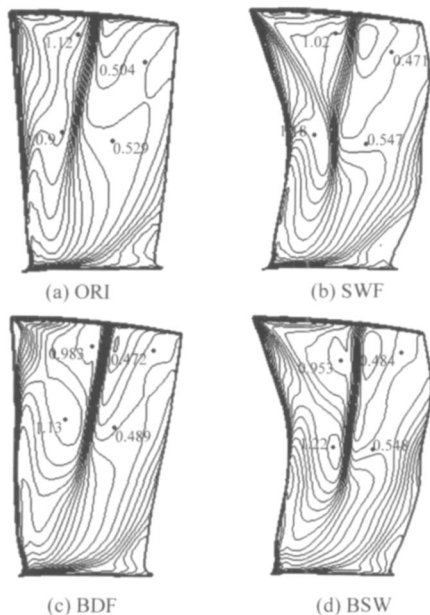


图 4 动叶吸力面相对马赫数等值线

Fig. 4 Contours of relative Mach number of rotors

3 种弯、掠动叶减弱了叶顶激波强度和叶顶负荷,从而减少了叶顶分离损失和泄漏损失.而在图 3 中动叶根部约 20 %叶高范围内,正弯(BDF)和前掠(SWF)动叶压气机的效率与原型相差不大,只有弯掠动叶压气机(BSW)在这一叶高范围内的效率与原型相比大幅提高,这是因为弯掠动叶具有比正弯和前掠动叶更强的减轻根部负荷的能力,使根部扩压段的逆压梯度明显减小^[6],从而使分离损失大幅降低,从而使根部效率大幅提高.图 3 中弯、掠动叶压气机在中部的效率都有所降低,这是因为弯、掠动叶由于中部负荷增大使激波强度增加(图 4),从而使中部分离损失增加.

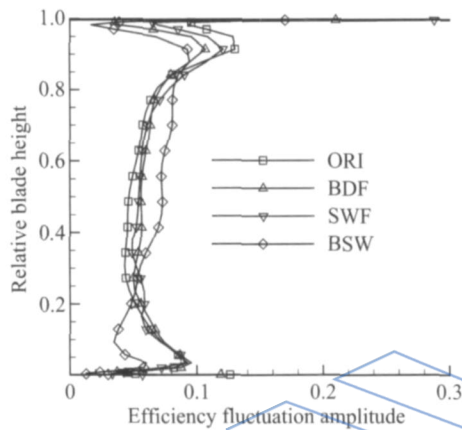


图 5 节距平均效率的非定常波动值径向分布
Fig. 5 Radial distributions of unsteady fluctuation amplitude of pitch averaged efficiency

为了具体地了解压气机效率非定常波动的幅度沿叶高的变化,定义效率的非定常波动值 E_{fa} (efficiency fluctuation amplitude):

$$E_{fa} = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{\bar{\eta}} \quad (1)$$

其中 $\eta_{\max}$ 和 $\eta_{\min}$ 分别表示某一叶高处的效率随时间变化的最大值和最小值, $\bar{\eta}$ 表示效率的时均值.图 5 是 4 种节距平均的压气机模型效率的非定常波动值沿叶高的分布,从中可以看到压气机的顶部和根部是效率波动最剧烈的地方,而中部的波动幅值较低.在原型压气机中顶部和根部约 20 %叶高范围内的效率波动非常突出,而 3 个弯、掠动叶压气机顶部的效率波动幅值明显降低,尤其是弯掠动叶压气机降低得最为明显,而且在弯掠动叶压气机的根部效率的波动明显减弱.比较图 3 和图 5 可以发现压气机效率的时均值分布与其波动幅值的分布是紧密相关的,在顶部和根部损失最大而且效率最低的地方效率的波动最剧烈,而

中部损失较低而且效率较高的地方也同时具有较低的效率波动.弯掠动叶压气机提高了顶部和根部的效率,降低了顶部和根部的分离损失,也使根部和顶部的效率波动显著降低,从而使压气机的总效率的波动幅值得到降低.

2.2 级效率非定常波动的机理分析

为了研究造成级效率非定常波动的流动机理,取原型压气机 50 %叶高截面的基元级作为代表进行分析.图 6 给出了原型压气机 50 %叶高截面在最高效率和最低效率时刻的熵等值线分布,从图中可以看到最高效率点的位置基本上都是处

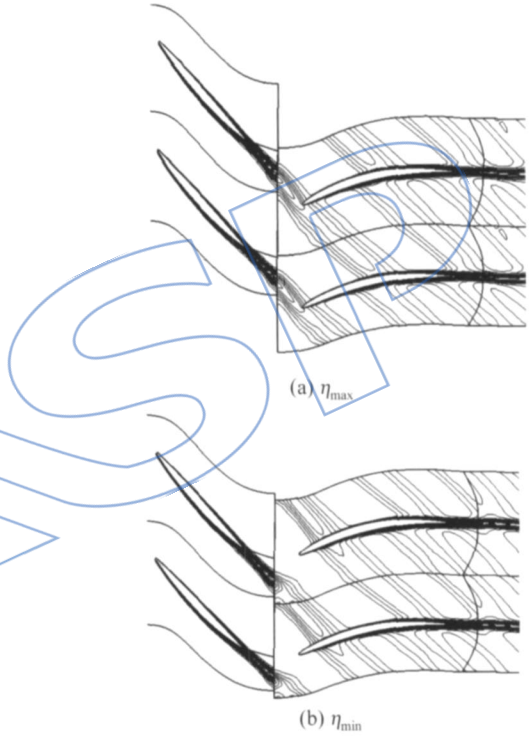


图 6 原型压气机 50 %叶高截面的熵等值线分布
Fig. 6 Entropy contours at 50 % span of original compressor

在当动叶尾迹刚好扫到静叶前缘位置附近,而最低效率点的位置对应于尾迹穿过静叶流道时的位置,这说明动叶尾迹在动叶主流中的耗散是压气机的损失增加的主要原因.当上游动叶尾迹撞击到下游静叶前缘时(最高效率位置),尾迹内的低能流体主要耗散到静叶表面的附面层里了;而当上游尾迹从静叶流道通过时,尾迹会与流道内的主流进行掺混发生动量交换从而带来较大的掺混损失.

以原型压气机级为例,如图 7 所示,由于级间气流角匹配的需要动叶被设计为扭动叶,因此动叶尾缘线和下游静叶前缘线在沿径向不同叶高处

的周向相位差都不相同,所以在不同叶高处动叶的尾迹会在不同的时刻扫过下游静叶的前缘,因此不同的基元级达到最高效率和最低效率的时刻各不相同.所以,如图 8 所示,原型压气机三个截面处的基元级的非定常效率波动曲线存在着相位差,而且不同叶高处效率波动曲线的相位差的大小与不同叶高处动叶尾缘线和静叶前缘线的相位差的差距成正比.

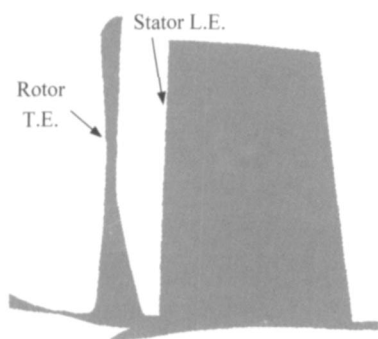


图 7 最低效率时刻的原型压气机

Fig. 7 Compressor with original rotor at the moment when lowest efficiency occurs

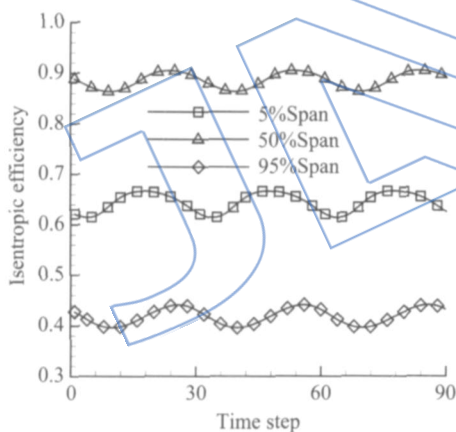


图 8 原型压气机三个截面的效率波动曲线

Fig. 8 Efficiency fluctuation curves of the compressor with original rotor at 5%, 50% and 95% spans

3 结 论

本章借助于数值模拟手段研究了正弯动叶(BDF)、前掠动叶(SWF)以及弯掠动叶(BSW)对跨声压气机级效率非定常波动的影响,并且分析了级效率非定常波动的流动机理,得到的结论如下:

1) 非定常计算条件下在计算周期内的每个瞬时,弯、掠动叶压气机的效率仍然比原压气机大幅提高,并且波动幅值明显减小,3种弯、掠动叶

使压气机效率波动幅度降低的程度与其时均效率提高的程度也是相对应的,效率提高的越多,波动的幅度越小.

2) 弯、掠叶片使压气机的效率随时间的波动曲线的相位发生了偏移,这是因为弯、掠动叶使压气机出口的尾迹和势流的相位发生周向变化,压力场和温度场的相位也因此发生变化.

3) 压气机损失的径向分布与其波动幅值的径向分布是紧密相关的,在顶部和根部损失最大的地方效率的波动最剧烈,而中部损失较低的地方具有较低的效率波动.弯、掠动叶压气机降低了顶部和根部的分离损失,也使根部和顶部的效率波动显著降低,从而使压气机的总效率的波动幅值得到降低.

4) 在压气机最高效率点的时刻动叶尾迹刚好扫到静叶前缘位置附近,而在最低效率点的时刻对应于尾迹穿过静叶流道时的位置,这说明动叶尾迹在动叶主流中的耗散是压气机的损失增加的主要原因,尾迹内的低能流体如果耗散到静叶表面的附面层里,会使压气机的效率提高.

参考文献:

- [1] Denton J D, Xu L. The effects of lean and sweep on transonic fan performance [R]. ASME Paper GT2002-30327, 2002.
- [2] Beini E, Biollo R. On the aerodynamics of swept and leaned transonic compressor rotors [R]. ASME Paper GT2006-90547, 2006.
- [3] 毛明明, 宋彦萍, 王仲奇. 跨音轴流压气机动叶的三维弯掠设计研究[J]. 动力工程, 2008, 28(1): 58-63.
MAO Mingming, SONG Yanping, WANG Zhongqi. Research on design of swept and bowed rotor in a transonic axial flow compressor[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(1): 58-63. (in Chinese)
- [4] MAO Mingming, SONG Yanping, WANG Zhongqi. Numerical investigation of the unsteady flow in a transonic compressor with curved rotors [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(2): 97-104.
- [5] 毛明明, 宋彦萍, 王仲奇. 弯掠动叶对跨声压气机非定常气动负荷的影响[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(12): 2033-2036.
MAO Mingming, SONG Yanping, WANG Zhongqi. Effect of curved rotor on unsteady aerodynamic loading in a transonic compressor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(12): 2033-2036. (in Chinese)
- [6] 毛明明, 宋彦萍, 王仲奇. 跨声速轴流压气机动叶弯和掠效应的应用[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(4): 581-586.
MAO Mingming, SONG Yanping, WANG Zhongqi. Application of bowed and swept rotors in a transonic axial

- compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(4):581-586. (in Chinese)
- [7] Halstead D E, Wisler D C, Okiishi T H, et al. Boundary layer development in axial compressors and turbines: Part 1-4[R]. ASME Paper 95-GT-461/462/463/464, 1995.
- [8] Gorrell S E, Car D, Puterbaugh S L, et al. An investigation of wake-shock interactions in a transonic compressor with DPIV and time-accurate CFD[R]. ASME Paper 2005-GT-69107, 2005.
- [9] 刘前智,周新海. 单级跨声速压气机三维非定常粘性流动计算[J]. 航空动力学报. 2000, 15(1):12-16.
LIU Qianzhi, ZHOU Xinhai. Computation of 3-D unsteady viscous flow in transonic compressor stage[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1):12-16. (in Chinese)
- [10] 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 (suppl.):21-24.
LIU Qianzhi, ZHOU Xinhai, HU Yuncong. Dual time-stepping for computation of 3D unsteady viscous flow through axial flow turbomachinery[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22 (suppl.):21-24. (in Chinese)
- [11] Chen M Z, Wu X H. Vortex simulation of rotor/stator interaction in turbomachinery[R]. ASME Paper 98-GT-15, 1998.
- [12] 周盛,韩振学,孟庆国. 计算流体力学在吸气式推进领域中的某些应用[J]. 空气动力学学报, 1998, 16(1):97-107.
ZHOU Sheng, HAN Zhenxue, MENG Qingguo. Some applications of computational fluid dynamics in the field of air breathing propulsion[J]. Acta Aerodynamica Sinica. 1998, 16(1):97-107. (in Chinese)