

文章编号: 1000-8055 (2009) 12-2689-06

跨声速压气机中动叶弯和掠对尾迹输运的影响

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: 对一单级跨声速压气机设计工况下采用了 3 种弯、掠动叶后的非定常流场进行了数值模拟, 分析了动叶弯、掠对动叶尾迹的非定常脉动强度以及向下游输运特性的影响. 研究表明: 与原型动叶相比, 3 种弯、掠动叶都减弱了动叶出口的泄漏涡和尾迹顶部脉动核心的脉动强度, 使其在向下游输运过程中耗散较快; 3 种弯、掠动叶尾迹的中间段的脉动强度都有所加强, 并且在输运过程中有向根部迁移的趋势, 从而使静叶的中部和根部受到较强的扰动.

关 键 词: 跨声速压气机; 非定常; 弯叶片; 掠叶片; 尾迹输运

中图分类号: V231

文献标识码: A

Effect of bowed and swept rotors on wake transportation in 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 effect of the bowed and swept rotors on rotor wake fluctuation intensity and transportation progress. The results show that, as compared to the baseline, all three types of bowed or swept rotors weaken the fluctuation intensity of tip leakage vortex and the top fluctuation core of wake at rotor outlet, thus quickening the dissipation during downstream transportation and helping to reduce the unsteady disturbance on the top of stator. The fluctuation intensity of the middle part of swept or bowed rotor wake increases to some extent, and the middle-part low energy fluid of rotor wake intends to move downwards during transportation, so the stator is disturbed stronger at mid-span and near hub.

Key words: transonic compressor; unsteady; bowed blade; swept blade; wake transportation

随着航空发动机性能的提升和推质比的提高, 压气机叶片承受的负荷将会不断提高, 从而导

致压气机内部流动分离更加容易发生. 通过弯、掠叶片抑制端壁附面层分离、合理改变和调整三维

收稿日期: 2009-04-18; 修订日期: 2009-06-27

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.

激波结构以减小压气机流道内部损失的方法引起了众多研究人员的重视并且取得了一定得研究成果. Roy^[1]进行了弯和掠两种叶片积迭形式的实验研究,结果表明弯叶片和掠叶片的损失都减小,而掠叶片损失减小得更为明显,并且弯叶片和掠叶片都有利于延缓叶片表面附面层的分离. Fischer 等人^[2]对一四级压气机的最后两级的静叶采用了大弯角的正弯设计,结果表明正弯静叶出口处的端壁分离区范围明显减小,而且在失速工况下此分离区由端壁移向中径处,避免了角区失速. 哈尔滨工业大学的王仲奇教授及其课题组继80年代深入研究弯叶片对涡轮性能的影响后,90年代又开始了弯曲扩压叶栅的研究,取得了许多研究成果^[3-7]. 然而,由于各学者所采用的叶型和工况条件都不相同,因此得到的结果并不完全统一.

现代叶轮机械的发展,在气动性能和可靠性方面提出了更高的要求,深入的理解和研究流动的非定常效应有着非常重要的意义. 动、静叶的非定常干涉对叶轮机械的工作性能和疲劳寿命都有着重要的影响,因此动静干涉的研究引起了越来越多的关注. Sanders^[8]通过实验研究了单级压气机中静叶受来流尾迹干扰时的非定常响应. Duralli 和 Kerebrock^[9]的实验结果表明单级跨声速压气机中非定常条件下静叶型面静压主要受动叶尾迹的影响. Lee 和 Feng^[10]通过数值方法研究了多级压气机中不同轴向间隙下动叶尾迹在静叶中的输运过程及其对静叶负荷的影响. 国内的邹正平等^[11]的数值研究结果表明,涡轮上游叶片排的尾迹对下游叶片的边界层流动损失的产生、发展和输运,以及表面吸力面负荷分布产生明显的影响. 季路成等^[12-13]提出通过考虑多叶排轮机相邻叶排间前排叶片尾缘线与后排叶片前缘线的空间位置匹配关系来进一步提升叶轮机的非定常性能.

鉴于目前在非定常条件下对叶片弯、掠对流动状况影响的实验与数值研究还不多见,本文以一单级跨声压气机为算例,借助于数值模拟手段研究了此跨声压气机的动叶弯、掠对动叶尾迹的脉动强度及其输运特性的影响,研究结果加深了对弯、掠叶片非定常气动干扰特性的认识.

1 数值模拟方法

本文研究的原型单级跨声压气机的参数在文献[6]中有详细介绍. 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,具体设计过程以及弯、掠动叶流场内的详细损失分布见文献[3].

采用商业 CFD (计算流体动力学) 软件 FINE/ TURBO 进行数值模拟,求解三维定常、非定常 Navier-Stokes (N-S) 方程组,选用一方程 Spalart-Allmaras (S-A) 湍流模型,控制方程组空间离散采用二阶迎风格式辅以矢量通量分裂算法,时间导数项由四阶 Runge-Kutta 法离散,并且采用了多重网格技术以加速收敛.

定常计算初场根据通流计算值给出,动、静叶间引入掺混界面方法;非定常计算初场给定为定常收敛解,动、静叶间采用滑移界面传递参数.

计算网格由 Autogrid 生成,为保证网格质量对整级所采用了 H-O-H 多块的结构化网格. 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.

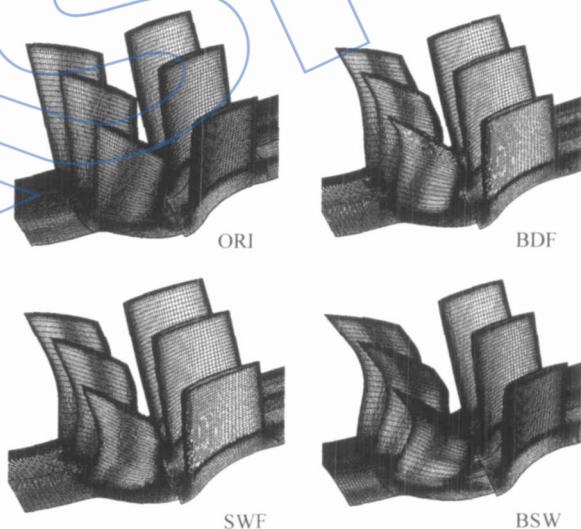


图1 网格示意图

Fig.1 Computational grids map

边界条件进口给出总温、总压,轴向进气条件,出口给定中径处背压,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.

时间精确模拟采用双重时间步方法加速收敛,将一个物理周期分为 30 个物理时间步,每一个物理时层内进行 50 个虚拟时间步数迭代. 计算中叶片通道数目为 21 : 24,为减少计算工作量简化为 1 : 1,叶片尺寸按比例改变,以保证稠度不变.

2 计算结果分析

为了研究动叶弯、掠对其尾迹的形状和运输的影响,图 2 和图 3 分别给出了 4 种压气机模型一个周期内两个 S_3 截面脉动强度系数的分布云图.脉动强度系数(ϕ_{fic})定义为 3 个方向扰动速度平方和的平方根与叶尖切线速度之比,这个变量可以表征非定常脉动的强烈程度.从图 2 所示的动叶出口 S_3 截面的脉动强度系数分布云图可以看到动叶出口主要存在 3 个高脉动区:聚集在上端壁附近的泄漏涡、通道根部的角区分离区和贯穿整个叶高的尾迹区,这 3 个高脉动区同时也是动叶出口的高损失区,是对下游静叶造成非定常扰动的主要来源.

在图 2 中可以看到,同原型动叶相比,3 种弯、掠动叶出口的高脉动区分布都发生了明显的变化.前掠动叶 SWF 与原型动叶 ORI 相比,叶顶

的泄漏涡和尾迹顶部脉动核心的脉动强度明显减弱,从而减弱了对下游静叶顶部的非定常扰动;然而 SWF 根部的尾迹脉动核心径向的影响范围变大,由约 40 %叶高范围延伸到了约 50 %叶高范围,并且根部角区分离区的径向影响范围也有所增大,对下游静叶中部的扰动加强.正弯动叶 BDF 与原型动叶 ORI 相比,也明显减弱了叶顶的泄漏涡和尾迹顶部脉动核心的脉动强度,但尾迹中部的脉动强度明显增大,也增强了对下游静叶中部的扰动.发生以上变化的原因是前掠动叶和正弯动叶都明显减少了动叶顶部附面层分离损失,降低叶顶泄漏涡强度,而增加了动叶中部的分离损失,从而使动叶出口的高紊流区的脉动强度也随之变化.前掠和正弯动叶尾迹根部的脉动强度没有明显变化,这是因为前掠和正弯动叶没有明显降低下端壁附近的分离损失.

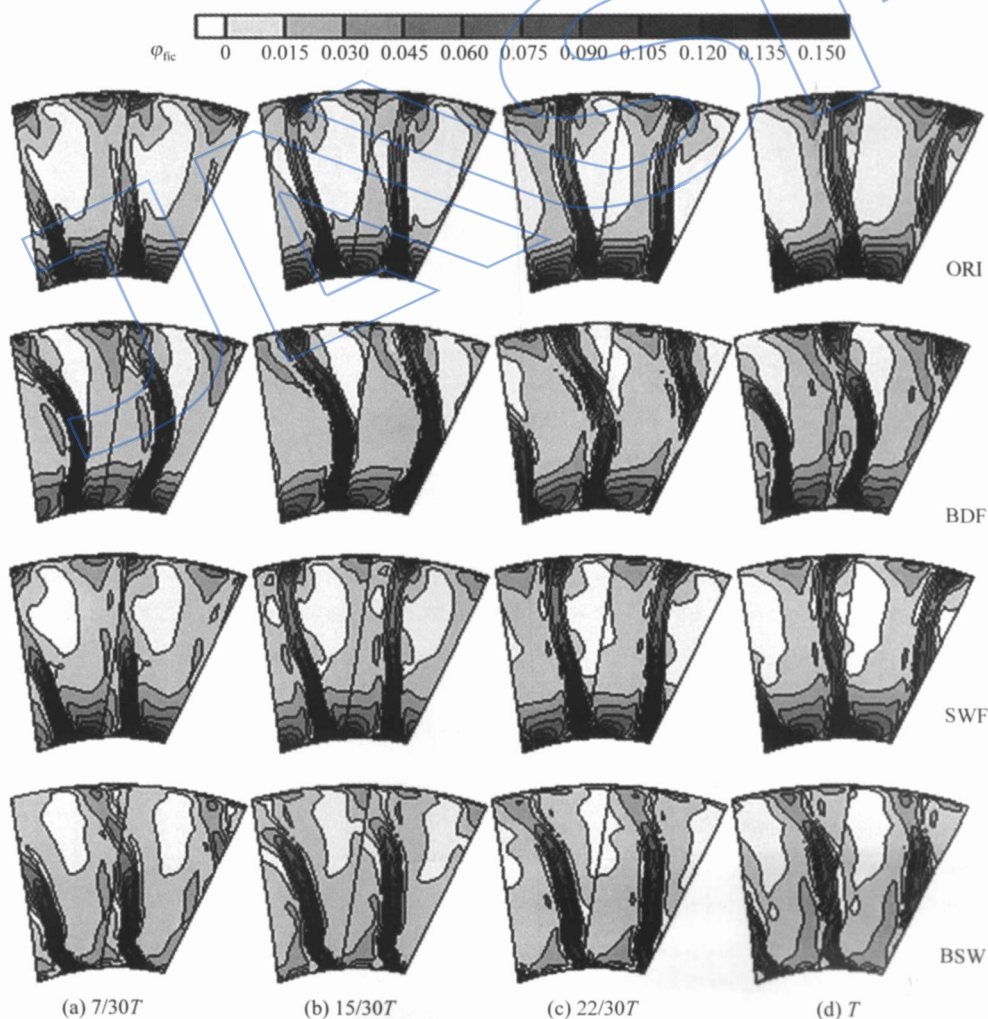


图 2 动叶出口脉动强度系数分布云图

Fig. 2 Coutour flooding of ϕ_{fic} at rotor outlet

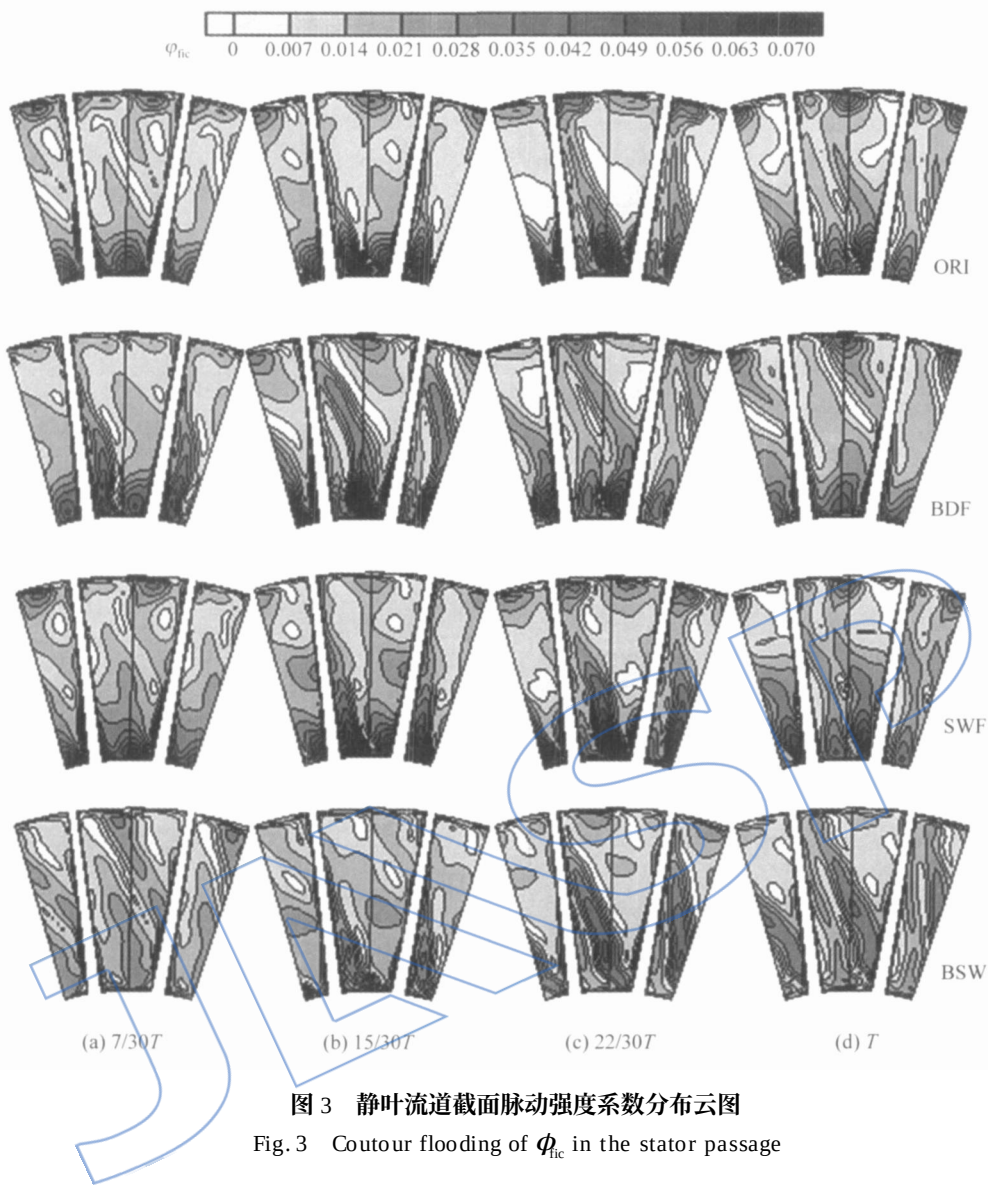


图 3 静叶流道截面脉动强度系数分布云图

Fig. 3 Coutour flooding of ϕ_{fic} in the stator passage

弯掠动叶 BSW 与原型动叶 ORI 相比,叶顶的泄漏涡和根部的分离角区脉动强度都明显降低,并且尾迹顶部和根部的两个脉动核心强度减弱,而中间段的脉动强度大大增加,而且叶顶泄漏涡的位置移至动叶压力面出口一侧.发生这种变化的原因有以下几点:①弯掠动叶使得动叶流道内的损失沿径向重新分配,端壁损失降低,中部损失增加,从而使得尾迹两端的脉动减弱,而中间段的脉动增强;②弯掠动叶使叶顶和根部的负荷降低,中部负荷增高,因此叶顶泄漏涡强度和根部角区分离减弱,并且叶顶泄漏涡可以由动叶吸力面发展到压力面附近.

由图 2 还可以看出,叶片弯曲后对尾迹的三维形状也会产生极大的影响.在动叶出口处尾迹的形状由于受到叶片形状的限制,因此表现出与叶片相同的形状,即直叶栅的为直线形状,而弯、

掠动叶的为与叶片形状相同的曲线形状.由于正弯和弯掠动叶与原型动叶和前掠动叶相比,各个截面在周向有了很明显的平移,因此正弯和弯掠动叶的尾迹形状有了很明显的周向弯曲,尤其是正弯动叶尾迹的弯曲最为明显.

由图 3 可看到,动叶尾迹以及叶顶泄漏涡和根部分离区随着动叶的旋转进入下游静叶流道后,被静叶切割为两部分,并且尾迹在向下游的输运过程中由于和主流的掺混耗散以及逆压梯度下的恢复作用而变宽.原型动叶的尾迹中间段的脉动强度较低,因此也耗散得较快,而尾迹两端的强脉动核心和叶顶泄漏涡以及根部角区分离区仍保持较强的脉动强度,因此对下游静叶的顶部和根部仍有较强的扰动作用.

正弯和前掠动叶的尾迹顶部脉动核心和叶顶泄漏涡的脉动强度与原型相比明显减弱,因此也

耗散得比原型快,而尾迹的中间段和根部以及根部角区分离区的脉动强度较大,耗散较慢,因此对下游静叶顶部的扰动较弱,而对中部和根部的扰动较强。弯掠动叶与原型动叶相比则是尾迹的两端以及顶部泄漏涡和根部角区分离区的脉动强度明显降低,尾迹中间段的脉动强度较强,因此在向下游运输的过程中尾迹的两端以及顶部泄漏涡和根部角区分离区掺混较快,尾迹中间段仍保持较强的紊流强度。然而此尾迹中间段向下游运输的过程中,受到径向压力梯度的作用而向根部迁移,从而仍对静叶的中部和根部造成较强的扰动。因此,与原型动叶相比,3种弯、掠动叶的尾迹在向下游运输过程中都减轻了对静叶顶部的扰动,而对静叶中部和根部的扰动较强。

3 结 论

通过对文中的跨声速压气机进行的非定常数值研究,对采用原型和3种弯、掠动叶的4种压气机级模型进行对比,可以得出以下结论:

1) 动叶出口主要存在3个高脉动区,聚集在上端壁附近的泄漏涡、通道根部的角区分离区和贯穿整个叶高的尾迹区,这3个高脉动区是对下游静叶造成非定常扰动的主要来源。

2) 3种弯、掠动叶都明显减弱了叶顶的泄漏涡和尾迹顶部脉动核心的脉动强度,其中弯掠动叶的作用最为明显。而且弯掠动叶还使动叶根部出口的分流区和尾迹根部脉动核心的脉动强度也同时得到减弱,这是因为弯掠动叶减轻端壁损失的能力最强。但3种弯、掠动叶出口尾迹中间段的脉动强度与原型动叶相比都有所增强,这是因为弯、掠动叶中部的损失有所增加,尤其弯掠动叶中部损失增加最多。

3) 正弯和弯掠动叶与原型动叶和前掠动叶相比,动叶的尾迹形状有了很明显的周向弯曲,这是因为正弯和弯掠动叶的各个截面在周向有了很明显的平移,尤其是正弯动叶尾迹形状的改变最明显。

4) 3种弯、掠动叶的尾迹在向下游运输的过程中,尾迹顶部脉动核心和叶顶泄漏涡的耗散最快,有利于静叶顶部表面的扰动减轻;前掠和正弯动叶动叶尾迹中间段和根部的脉动强度较高,并且在向下游运输中耗散较慢,因此使静叶的中部和根部都受到较强的扰动;弯掠动叶虽然动叶出口尾迹根部和根部分离区的脉动强度明显降低,但其尾迹中间段的脉动强度显著增强,并且尾迹

中间段低能流体在运输过程中受到径向压力梯度的作用向根部迁移,因此也使静叶的中部和根部都受到较强的扰动。

参考文献:

- [1] Roy B, Laxmiprasanna P A, Vishal B. Low speed studies of sweep and dihedral effects on compressor cascades[R]. ASME Paper 2002- GT-30441.
- [2] Fischer A, Riess W, Seume J R. Performance of strongly bowed stators in a 4-stage high speed compressor [R]. ASME Paper 2003- GT-38392.
- [3] 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)
- [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. 跨声压气机动静干涉效应的数值研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(9): 1468-1474. MAO Mingming, SONG Yanping, WANG Zhongqi. Numerical research on influence of rotor-stator interactions in transonic compressor [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 29(12): 2033-2036. (in Chinese)
- [7] 毛明明, 宋彦萍, 王仲奇. 动叶弯和掠对压气机效率非定常波动的影响[J]. 航空动力学报, 2009, 24(11): 2564-2569. MAO Mingming, SONG Yanping, WANG Zhongqi. Effect of bowed and swept rotors on efficiency unsteady fluctuation in a transonic compressor [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(11): 2564-2569. (in Chinese)
- [8] Sanders A J, Fleeter S. Multi-blade row interactions in a transonic axial compressor: Part II—Rotor wake forcing function and stator unsteady aerodynamic response [R]. ASME Paper 2001- GT-0269.
- [9] Durali M, Kerrebrock J L. Stator performance and unsteady loading in transonic compressor stages [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120: 224-232.
- [10] Lee Y, Feng J. Potential and viscous interactions for a multi-blade row compressor [R]. ASME Paper GT-2003-38560.
- [11] 邹正平, 叶建, 张永新, 等. 非定常流动对叶片表面负荷分布影响的数值模拟研究[J]. 燃气轮机试验与研究,

2006,19(1):21-26.

ZOU Zhengping, YE Jian, ZHANG Yongxin, et al. Numerical simulation of unsteady flow effects on turbine blade loading distributions[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2006,19(1):21-26. (in Chinese)

[12] 季路成, 陈江. 叶轮机非定常气动设计的缘线匹配: (I) - 理论与实施方法[J]. 推进技术, 2005,26(4):307-312.

JILucheng, CHEN Jiang. Edge matching for unsteady design of turbomachinery:(I) —Theory and implementation [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005,26(4):307-312. (in Chinese)

[13] 陈江, 季路成. 叶轮机非定常气动设计的缘线匹配: (II) - 数值研究[J]. 推进技术, 2005,26(4):313-318.

CHEN Jiang, JILucheng. Edge matching for unsteady design of turbomachinery:(II) —Numerical investigations [J]. Journal of Propulsion Technology, 2005,26(4):313-318. (in Chinese)

JALSP