

文章编号: 1000-8055(2007)07-1082-05

BVF 诊断在非定常转静匹配中的应用

饶 杰, 袁 巍, 李秋实, 弓志强, 陆利蓬

(北京航空航天大学 发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 对一台高负荷跨声速单级风扇进行了非定常数值模拟. 并将 BVF(boundary vorticity flux, 边界涡量流) 诊断方法应用于非定常条件下的转静干涉研究中. 结果表明 BVF 不仅能够清晰地捕捉到转静干涉对流场的影响, 指出转子叶排的尾迹干扰是引发下游叶排通道流场非定常特性的最主要因素, 还能够根据叶片表面出现的一些细节, 结合静压、熵等分析方法, 找出动叶的叶尖和静叶的叶根在转静匹配中存在的问题. 表明 BVF 诊断方法能够反映出转静匹配的状态好坏, 并指出改进设计方向, 是一种能够有效找出对流场产生负面影响的根源, 并指出削弱甚至消除这些负面影响办法的新型诊断方法.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 风扇; 非定常; 边界涡量流; 转静干涉

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Application of BVF diagnosis on unsteady rotor/stator matching

RAO Jie, YUAN Wei, LI Qiushi, GONG Zhiqiang, LU Lipeng

(National Key Laboratory on Aero-Engines,

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

Abstract: An unsteady numerical simulation for a high-loaded transonic fan was performed. And, BVF(boundary vorticity flux) diagnosis method was employed to study the rotor/stator interaction under unsteady conditions. The results show BVF could capture clearly the influence of rotor/stator interaction upon the flow field, indicating that rotor wake interference was the primary cause of unsteady characteristic in downstream flow. According to the detailed BVF distribution by combining the static pressure and entropy analysis methods, the problems in the rotor tip and stator root for rotor/stator matching were found out. So, BVF diagnosis is a new method that could help reflect the state of rotor/stator matching, and also find out the root of negative factors to the flow field and the solution for flow field improvement.

Key words: aerospace propulsion system; fan; unsteady; boundary vorticity flux; rotor/stator interaction

现代航空技术的发展, 要求发动机推重比不断提高, 对于风扇/压气机来说, 就是要减少级数, 提高压比和级负荷, 得到更高的气动性能. 于是, 转静匹配问题在风扇/压气机的设计中显得愈加重要. 转静干涉现象在轴流压气机的研究中有着不可忽略的作用, 因为这一现象是压气机内非定常流动的主要来源, 对压气机的气动性能、噪声都

有着较大的影响.

具体来说, 转静干涉的非定常性主要有以下两个方面因素: 一是相邻叶排间的势干扰, 叶轮机在运行过程中每排叶片都会产生自身的速度势场或压强势场, 叶排之间的相对运动造成了任何一排叶片都要掠过相邻叶排的周向非均匀势场, 形成叶排势场间的非定常干扰; 二就是尾迹干扰, 在

收稿日期: 2006-06-13; 修订日期: 2006-11-07

作者简介: 饶杰(1982), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事叶轮机械非定常流动研究.

尾迹向下游输运的过程中,上游叶排产生的尾迹在下游叶排的相对运动下被切割片段,受流经叶排环量和压强梯度的影响而被拉伸扭转,从而成为在下游叶排坐标系下非定常流动的主要原因。

在国外,很早就开始了转静干涉对压气机气动性能影响的研究.在对轴向间距的研究中,Gallus^[1]在进行了实验后发现,在轴向间距较大时,转子受静子的势干扰影响很小,而 Smith^[2]则指出转静之间的轴向间距对于轴流压气机的气动性能有显著影响.对于转子和静子之间的相对旋转对于压气机性能的影响,也有人专门作了针对性的研究。

BVF 诊断这种方法,早期是用于对外流机械的诊断研究^[3],近年来,李秋实^[4]和郭明^[5]将这种方法引入到对内流机械的研究中.本文研究内容的最大特点在于,将 BVF 诊断应用于非定常条件下的转静干涉研究中,通过诊断发现转静匹配的问题,以期获得气动性能上的提升。

1 BVF 诊断方法

BVF 诊断是基于局部动力学诊断发展起来的一种诊断方法.其实质是将作用在叶片上的合力和合力矩表示为 BVF 一阶或二阶矩的积分形式,通过观察叶片表面的 BVF 分布,就可以分析出对叶片力矩产生正贡献和负贡献的区域,更直观地看到一些关键区域的重要的病灶信息,从而揭示原来的积分变量的动力学演化过程,追究出物面上导致这些变化的物理根源。

BVF 这一概念最早是由英国的 Lighthill^[6]在 1963 年提出来的,其定义式为

σ = (μ/ρ) ∂ω/∂n

其中,ω=∇×u 是涡量,μ 是动力学粘性系数,ρ 是流体密度,Δn 是流体表面单位法向矢量. BVF 是在单位时间内通过单位物体表面面积进入流体的涡量的量度.对于三维有粘可压流,它由三部分组成,σ=σa+σn+στ,分别是指附体条件下,壁面∂B 上加速度a在切向上的分量、正应力和切应力在切向上的导数引起的 BVF。

σa = n × a, a = (D u / Dt) ∂B

σn = (1/ρ n) × ∫_Δ Π ∂Π = p - [ζ + (4/3)μ] ∂

στ = (1/ρ) (n × ∫_Δ) × (μ ω), τ = μ h × ω

其中 p 是压力,∂=∇·u 是膨胀系数,ζ 是体积粘

性系数。

在雷诺数较大的情况下,στ 与 σn 相比要小得多,可忽略.在算例分析中,也没有把 στ 的影响考虑进去。

2 研究对象和计算工具

计算对象是一台单级高负荷跨声速风扇,在设计转速为 21 500 r/min 的前提下,流量为 26 32 kg/s,级压比为 2.252,绝热效率为 0.885 5. 风扇转静叶的轴向间距根部是 10% 动叶轴向弦长,尖部有 26% 动叶轴向弦长,因而流动具有非常强的非定常性.非定常计算采用的是简化模型的方法:原型动叶 14 片,静叶 34 片,简化模型动叶 14 片不变,静叶改为 28 片,这样计算域涉及一个转子通道和两个静子通道,减少了计算量.计算网格采用 H 型网格,轴向 246 个网格节点(转子 121,静子 125),径向 41,周向 33,一个通道分 20 个物理时间步,在计算中没有考虑叶尖间隙的影响.计算使用的是 Numeca 商用计算软件,求解 Turbulent Navier-Stokes 方程,采用二阶精度的 Jameson 中心差分格式,湍流模型选用 Spalart-Allmaras 模型.进口给定总温、总压以及进气角,出口给定叶根处的反压,然后按照径向分布计算出整个叶高的反压。

3 计算结果及分析

通过对叶片表面的 BVF 分析发现, BVF 峰值一般出现在前尾缘区域,尤其是叶根和叶尖的前尾缘处.如图 1 和图 2 所示,时均下峰值区主要集中在转子的吸力面和静子的压力面上,转子吸力面 BVF 分布图中间的正峰值区域反映的是激波的位置.相对而言转子的压力面和静子的吸力面峰值区域就要少很多,变化也比较平缓.峰值的出现说明这些区域壁面产生的涡量流较大,也说明叶片表面的压力梯度过大,这些往往会对流动产生不利的影响,通常是使流动损失加剧,甚至有可能造成流动分离。

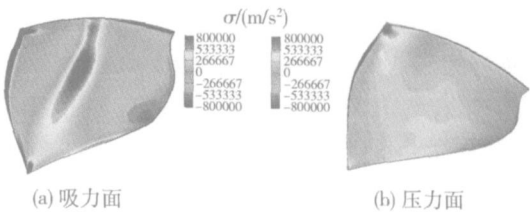


图 1 时均下转子吸力面和压力面 BVF 分布

Fig. 1 Rotor time averaged BVF surface distribution

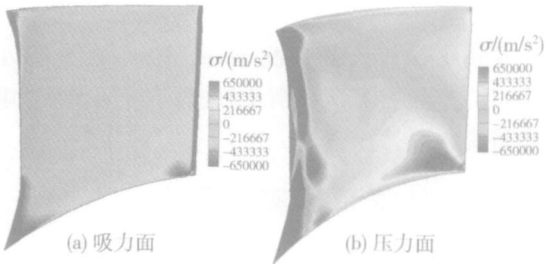


图 2 时均下静子吸力面和压力面 BVF 分布
Fig. 2 Stator time averaged BVF surface distribution

图 3 所示的是一个转静相对转动周期内叶片

表面的 BVF 分布变化图. 从图中转子叶片表面的 BVF 分布来看, 一周期内各时刻的变化很不明显, 这说明静子对转子的势干扰非常微弱. 而静子叶片表面的 BVF 分布变化却非常明显, 所以在这里就主要针对静子叶片表面的 BVF 分布进行分析. 从时均情况与非定常情况的对比来看, 静叶上的 BVF 峰值分布有两处变化最为显著: 一是在叶根尾缘处. 由于一直存在很强的峰值(吸力面上为负的峰值, 压力面上为正的), 说明在静叶叶根靠近尾缘的地方存在着设计的缺陷, 叶型上还需要改进.

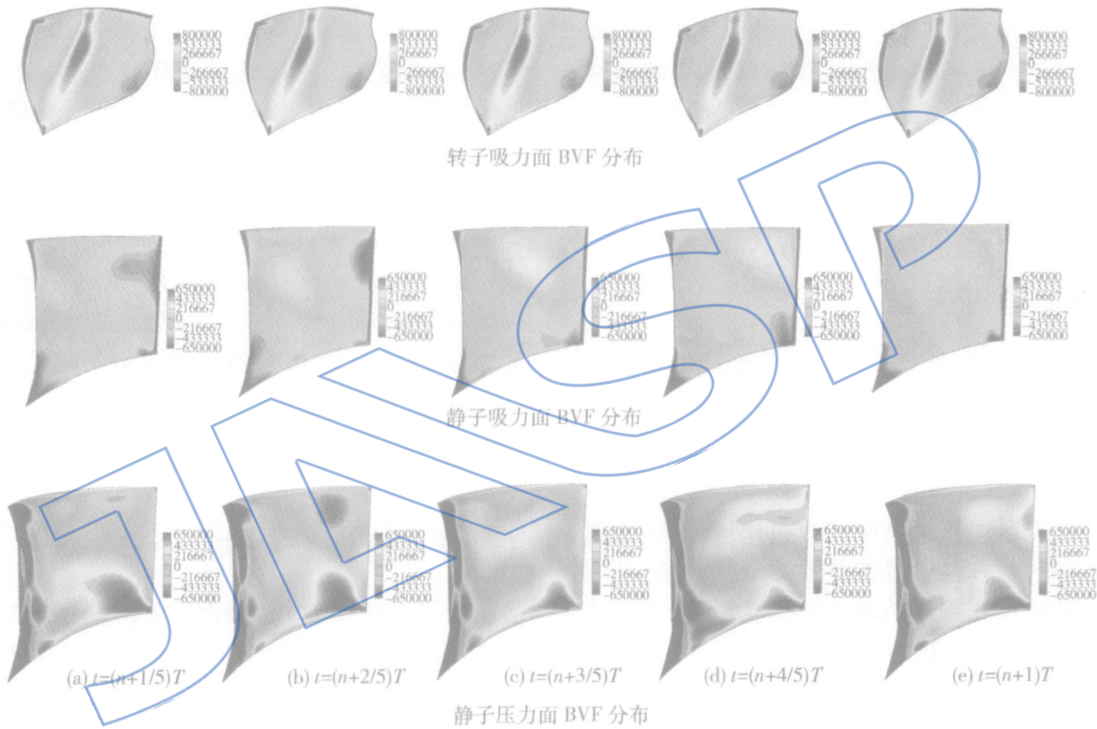


图 3 一个转静相对转动周期内叶片表面 BVF 变化图(单位: $\sigma/(m/s^2)$)
Fig. 3 Blade surface BVF variation between a revolution period(Unit: $\sigma/(m/s^2)$)

从图 4 的静压分布可以看出, 静子对转子尾迹的切断、扭曲、拉伸, 以及尾迹段在静子通道中的输运, 使得静子表面压强呈现出高幅脉动现象. 吸力面上有两处静压明显提升: 一是在 0.2 到 0.4 倍轴向弦长, 这里是由于驻点的影响, 叶片吸力面的前缘出现了超声速区并产生了局部的激波, 使得静压上升明显; 还有一处是在尾缘, 这是尾迹的影响所致. 再看压力面, 整个压力面上的静压分布在 0.8 倍轴向弦长以前都是比较平坦的, 但是在尾缘却出现明显地下降, 这显然是不合理的, 说明在静叶叶根的设计需要改进.

图 5 所示的是实验用总压耙测得的结果, 在周向上分布 11 个等间距的测点来测量出口总压

的分布. 实验结果表明, 在静叶的叶根附近出现了大范围的尾迹亏损, 叶根区域存在着较大的分离,

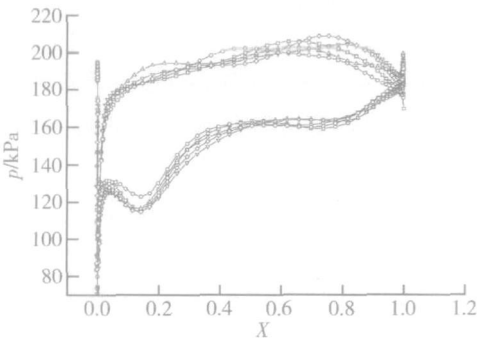


图 4 静叶 10% 叶高处截面的静压分布
Fig. 4 Stator 10% span static pressure distribution

这说明此区域转子和静子之间匹配得不好. 产生这种结果的原因可能是以下两点: 由于子午通道过大的收缩而导致转子中下部的加功量向级出口叶根处堆积; 静叶叶根本身存在问题, 需要改进设计.

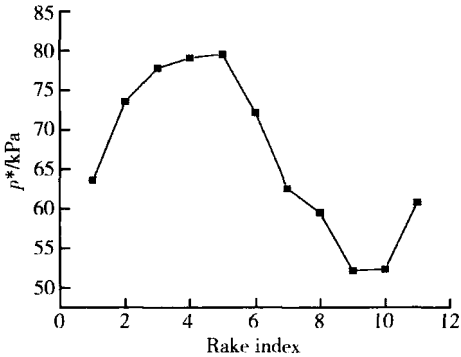


图 5 静叶 10% 叶高处出口总压
Fig. 5 Stator 10% span outlet total pressure

图 6 是一周期内静叶吸力面的极限流线分布图. 可以看到, 在叶片的前半部分, 流线基本是沿着流道方向, 没有出现大的变化; 在靠近尾缘的地方, 流线突然折向叶根, 并由此形成了一条流向叶根的汇聚线, 而这条汇聚线所在的位置, 正好与图 3 中静叶吸力面上 BVF 分布变化最显著的地方相对应. 这表明低能流体向叶根尾缘聚集, 该处的流动损失较大, 并且产生了局部堵塞, 这进一步说明了静叶叶根需要改进.

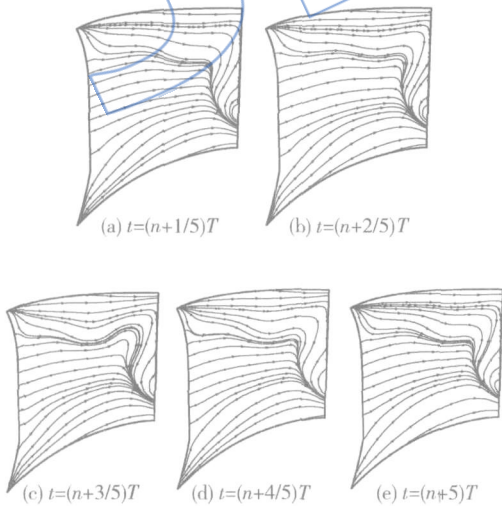


图 6 一周期内静叶吸力面极限流线图
Fig. 6 Streamline on stator suction surface in one revolution period

由于 BVF 诊断所得到的结果与常规分析方法得到的结果有着很好的一致性, 说明 BVF 诊断

这种方法, 可以作为常规分析方法的有益的辅助; 而与实验测得结果所得结论的一致, 说明 BVF 诊断是值得相信的, 是可以用于流场诊断的一种新型诊断方法.

图 3 中还有一处比较明显的 BVF 分布变化是在近 3/4 叶高从 1/2 弦长一直到尾缘处, 该处的 BVF 峰值经历了从负峰值到正峰值再到负峰值的变化. 由于其变化周期与转子掠过一静子通道的周期相同, 所以初步可以认定其变化与转子紧密相关. 分析转子出口截面的熵分布(如图 7), 发现转子出口叶尖的角区分离比较严重, 随着转子与静子之间的相对旋转, 产生的分离涡对下游静子的进口熵分布产生了周期性变化的影响(图 8), 这说明转子的出口流场对静子的进口流场产生了很大的影响, 而这种影响变化集中体现在叶尖特别是 3/4 叶高处, 使得静子在该叶高上出现正负峰值的交替变化. 从这里就可以得到两点结论: 转子的尾迹对静子通道内的流场影响很大; 3/4 叶高上的 BVF 峰值变化是由转子出口叶尖的角区分离产生的分离涡引起的, 这说明在转静匹配上, 转子的叶尖还有值得改进的地方.

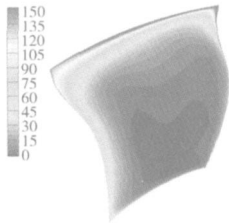


图 7 时均下转子出口截面熵分布(单位: $s/(J/kg \cdot K)$)
Fig. 7 Time averaged entropy distribution of stator outlet cross section(Unit: $s/(J/kg \cdot K)$)

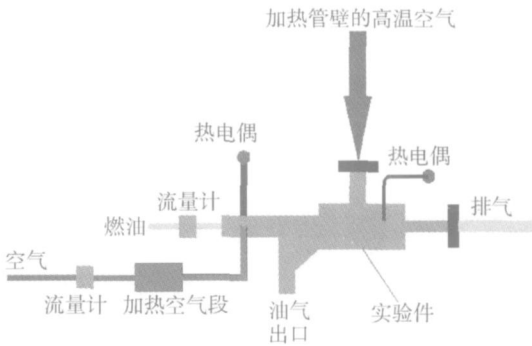


图 8 静子进口截面熵分布
Fig. 8 Entropy distribution of stator outlet cross section

4 结 论

(1) 在本算例中, 上游叶排的尾迹干扰在转静干扰中起主要影响, 转子叶排和静子叶排之间的势干扰影响很小.

(2) 从转静匹配的角度来看, 转叶的叶尖和静叶的叶根还有值得改进的地方, 对于转叶, 需要减小叶尖的转角, 以减少叶尖的流动分离, 达到改善下游静子叶排流场的效果; 对于静叶, 则可以有两种办法, 一是减缓子午通道在静叶通道内的收缩, 二是适当增加静叶根部的轴向弦长, 修改静叶的叶型.

(3) 非定常 BVF 诊断, 能够反映出转静匹配的状态好坏, 并指出改进设计的方向, 是一种能够有效找出对流场产生负面影响的根源, 并指出削弱甚至消除这些负面影响办法的新型诊断方法.

参考文献:

[1] Gallus H E, Lamberts J, Wallmann T. Blade row interaction

in an axial flow subsonic compressor statq J]. AMSE Journal of Engineering for Power, 1980, 102: 169-177.

[2] Smith L Jr. Casing boundary layers in multistage axial flow compressors flow research in blading[M]. Amsterdam: I. Elsevier Publishing Company, 1970.

[3] WU Jiezhi, Roach R L, Lo C F, et al. Aerodynamic diagnostics and design based on boundary vorticity dynamics[C] // 17th AIAA Applied Aerodynamics Conference. AIAA-99-3103.

[4] LI Qiushi. An exploration to diagnose and design for turbomachinery based on boundary vorticity dynamics[D]. Post P. H. D. Dissertation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2002. 11.

[5] GUO Ming, LI Qiushi, HOU Anping, et al. A diagnostic and design approach of axial compressor based on local dynamics[R]. ASME GT2006-91116.

[6] Lighthill M J. Laminar boundary layer[M]. Oxford: Oxford University Press, 1963: 46-113.