跨声风扇转子的 BVF气动优化方法

吴 宏 李秋实 郭 明 周 盛

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 将加功量作为目标函数并结合边界涡量流 BVF (Boundary Vorticity Flux)这个诊断因子, 对某高性能跨声风扇转子进行了优化. 通过基于局部动力学的 BVF诊断可以捕捉到流场分离流动在叶片表面上的物理根源, 可以清晰的显示出激波结构. 尽管优化后加功量增大, 但因为 BVF分布改善, 激波结构和分离流动被良好地控制. 三维粘性 N-S (Navier-Stokes)程序计算结果表明, 风扇转子在近峰值效率工况下压比提高了 7.69%, 效率提高了 1.92%, 在全工况范围转子性能都得到了较大提升. 基于 BVF诊断的优化手段在风扇/压气机的优化中可起到很大的作用.

关 键 词: 风扇/压气机; 气动优化; BVF

中图分类号: V 211.6

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)01-0014-04

Aerodynamic optimization method of transonic fan rotor based on BVF

Wu Hong Li Qiushi Guo Ming Zhou Sheng

(National Key Laboratory on Aero-Engines, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The aerodynamic optimization of a transonic fan rotor was implemented by controlling the BVF (boundary vorticity flux) distribution on rotor blade. A novel objective function of torque associated with BVF was used to optimize the blade configuration. The physical sources of separated flow could be probed on rotor blade through the BVF diagnosis, which was a novel diagnosis method based on local dynamics. The shock structure was showed clearly on the rotor blade in this diagnosis method. Although the torque of the optimized rotor was increased, the shock strength was decreased and the separated flow was controlled better, as the BVF distribution was better than before. The results of 3D CFD (computational fluid dynamics) analysis indicate that not only the total pressure ratio of rotor is increased by 7.69%, but also the adiabatic efficiency is increased by 1.92% too. The optimized rotor has a higher performance over a wide range of mass flow. The optimization method based on BVF can play an important role in the optimization design of fans/compressors.

Key words: fans/compressors; aerodynamic optimization; BVF

风扇/压气机设计需依赖大量经验公式和经验参数. 随着 CFD (Computational Fluid Dynamics)的发展、计算机计算能力的提高和高效算法的发展, 风扇/压气机的气动数值优化逐渐成为可能. 发展风扇/压气机气动数值优化以提高设计效率和减少设计成本是叶轮机设计者追求的目标.

在外流方面, 许多研究者对机翼的气动数值优化工作已经做得很完善. 如 Jameson 提出利用控制理论求解目标函数梯度的方法实现了对翼型的自动优化[1]. 在边界涡量动力学基础上, 吴介之进一步提出了局部动力学诊断理论, 通过控制机翼翼型表面的边界涡量流 BVF (Boundary Vorticity Flux)分布在翼型气动诊断和设计优化上取得了很大的成功[2].

而在内流方面由于流动复杂和结构复杂等诸多问题, 风扇/压气机的三维气动数值优化困难很大. 因为优化过程中要多次进行流场求解, 考虑到计算时间和成本的因素, 大多数研究者往往是对

收稿日期: 2005-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10577002)

作者简介: 吴 宏 (1982-), 男, 江西南昌人, 博士生, whbuaa@sjp.buaa.edu.cn

风扇/压气机二维叶型进行 Q3D(准三维)优化. 文献[3]通过对三维叶片的几个截面进行 Q3D优化来提高绝热效率, 但由于三维流动影响, 在叶根和叶尖区域不够准确. 文献[4]不仅成功地运用梯度方法对跨声转子叶片进行了 Q3D优化, 而且还对该转子进行了全三维优化, 在全工况范围内效率都得到了提高.

以上所提到内流方面的文章在优化过程中都是以提高绝热效率为目标, 很少看到将风扇/压气机的最大负荷作为优化目标的文章. 自从 MIT的 Kerrebrock等利用抽吸气的控制手段成功实现风扇单级压比 3.4以来[5], 采用控制手段实现风扇极限负荷成为研究的一个热点. 然而在不用控制手段的情况下风扇单级压比最大能达到多少呢?

本文就是带着这样一个疑问, 以提高风扇负荷为目的, 将加功量作为目标函数. 优化过程中首先对各流面基元叶型进行参数优化, 然后加以必要的几何约束, 为了充分考虑三维效果, 应用三维粘性 N-S(Naiver-Stokes)程序求解流场评价目标函数, 借助边界涡量流 BVF的诊断方法, 实现高负荷风扇转子外型优化.

1　边界涡量流 BVF的概念

边界涡量流 BVF是边界涡量动力学理论的核心概念, 它的物理意义是单位时间内通过单位面积的涡通量[6]. 此概念是 Lighthill在 1963年提出的, 定义为

$$\sigma = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial \omega}{\partial \boldsymbol{n}} \tag{1}$$

其中, σ 表示 BVF值; $\omega = \nabla \times \boldsymbol{u}$ 是涡量, $\boldsymbol{u}$ 为速度; μ是动力粘性系数; ρ是密度; $\boldsymbol{n}$ 是壁面处的流体表面外法线方向. 对于一般三维粘性可压有旋流, σ 包括 4个部分[2]:

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_f + \sigma_p + \sigma_\tau \tag{2}$$

分别是由壁面加速度 a_B, 体积力 f, 压力梯度 p 和切应力 τ产生. 这 4部分分别定义为

$$\left.\begin{aligned} \sigma_a &= \boldsymbol{n} \times a_B \\ \sigma_f &= -\boldsymbol{n} \times f \\ \sigma_p &= \frac{1}{\rho}\boldsymbol{n} \times \nabla p \\ \sigma_\tau &= \frac{1}{\rho}(\boldsymbol{n} \times \nabla) \times (\mu\omega) \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

对于本文的跨声风扇转子, 是在转速恒定不变、忽略体积力和雷诺数较大的前提下讨论, 所以 σ_a 和 σ_f 为 0, 而当雷诺数较大时, σ_τ 比 σ_p 小的多, 量级上可以忽略, 所以在本文中只考虑压力梯度产生的 BVF.

2 叶轮机轴向力矩的 *BVF* 表达形式

在柱坐标 (r, θ, z)下, 数学上成立

$$(\boldsymbol{n} \times \nabla)(p\boldsymbol{r}^2) = \boldsymbol{r}^2(\boldsymbol{n} \times \nabla p) + 2p\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{r} = \rho\boldsymbol{r}^2\sigma_p + 2\boldsymbol{r} \times (-p\boldsymbol{n}) \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{r}$为径向坐标. 所以轴向力矩的 BVF表达形式为

$$M_z = -\int_{S_b}(\boldsymbol{r} \times p\boldsymbol{n})_z \mathrm{d}S = -\frac{1}{2}\int_{S_b}\rho\boldsymbol{r}^2\sigma_{pz}\mathrm{d}S + \frac{1}{2}\oint_b p\boldsymbol{r}^2\mathrm{d}z \tag{5}$$

其中, S_b 代表叶片表面; M_z 是风扇/压气机对流体的总轴向力矩; σ_{pz}是 σ_p 的轴向分量, σ_{pz}将在本文中用来进行 BVF诊断[7], 在下文所指的 BVF都是指 σ_{pz}. 式(5)右边第一项为 BVF矩的面积分, 第二项为表面力矩的边界线积分. 式(5) BVF表达的轴向力矩将在本文中作为优化的目标函数, 从而通过改善叶片 BVF分布提高风扇负荷.

3　优化模型

一个优化问题一般包括: 目标函数、优化参数、约束条件和优化算法等.

3.1　目标函数

本文目标函数选为轴向力矩 M_z 的相反数, 求目标函数最小值使轴向力矩最大. 由于式(5)最右边第二项是沿边界线积分, 只与叶根和叶尖型线有关, 因此在处理目标函数时对于叶根和叶尖基元级, 目标函数取为

$$\mathrm{min}F_1 = \frac{1}{2}\int_{S_b}\rho\boldsymbol{r}^2\sigma_{pz}\mathrm{d}S - \frac{1}{2}\oint_b p\boldsymbol{r}^2\mathrm{d}z$$

对于叶根至叶尖的中间基元级, 目标函数选为式(5)中最右边第一项相反数, 即

$$\mathrm{min}F_2 = \frac{1}{2}\int_{S_b}\rho\boldsymbol{r}^2\sigma_{pz}\mathrm{d}S$$

当各基元级目标函数最小时, 轴向力矩最大, 在保持转速 Ω不变情况下加功量 $G = \Omega M_z$ 最大.

3.2　优化参数

叶型参数化是优化过程中的重要步骤. 一个好的参数化定义方法应是用尽量少的自由参数使叶型在尽可能大的合理范围内变化. 对于基元叶型可以用三次样条或 B样条分别定义压力面和吸力面, 也可以定义中弧线和厚度分布. 本文用三次多项式

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \tag{6}$$

来定义中弧线和厚度分布. 对于中弧线, x为流线

曲线坐标 m, y 为回转面上弧长 $r\times\theta$. 优化参数选为中弧线三次多项式的 4个系数, 而厚度分布不变.

3.3 约束条件

为了保证优化过程中叶型变化合理, 对其加以合适的约束是必需的. 在此所加约束为保持转子前尾缘空间坐标不变.

3.4 优化算法

优化算法采用了简单的梯度方法. 对于本文的优化问题可以简单表达为

目标函数: $F(\boldsymbol{X})$

约束条件: $g_j(\boldsymbol{X})=0 \quad j=1,2$ (7)

其中, F 是目标函数; $\boldsymbol{X}$ 为优化参数组成的向量; g_j 为约束函数. 由每两迭代步可求出目标函数的梯度 $\nabla F(\boldsymbol{X})$:

$$\frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{X}_k}=\frac{F(\boldsymbol{X}_k+\Delta\boldsymbol{X}_k)-F(\boldsymbol{X}_k)}{\Delta\boldsymbol{X}_k} \quad (8)$$

$\boldsymbol{X}_k$ 是第 k 个优化参数. 然后确定下一搜索步:

$$\boldsymbol{X}^{n+1}=\boldsymbol{X}^n-\lambda\cdot\nabla F(\boldsymbol{X}) \quad (9)$$

其中 λ 为搜索步长. 直到满足 $\|\nabla F(\boldsymbol{X})\|\leqslant\xi$ (ξ 为给定小量), 迭代终止.

由于本文工作主要目的在于探索 BVF 优化方法的可行性, 所以在叶型参数化和优化算法上都采用了较简单的方法.

4 优化结果及 *BVF* 诊断分析

优化原型为一已通过实验验证的单级跨声风扇的转子, 设计转速为 21 500 r/min, 叶尖切线速度为 495.32 m/s. 整级实验最高效率点流量 26.608 kg/s, 级压比为 2.2, 级效率为 88.31%. 本文优化过程中所用流场计算程序为课题组发展的三维粘性 CFD 程序, 采用有限体积格式, 4步 Runge-Kutta时间推进的方法求解雷诺平均 N-S 方程组. 湍流模型采用 B-L模型. 优化叶型最后使用了 NUMECA 商用软件进行校核, 以下结果为 NUMECA 计算结果.

4.1 优化前后转子特性对比

NUMECA 计算所用网格轴向 ×径向 ×周向网格点数为 129×41×33, 叶片通道轴向网格点数为 65. 进口边界条件给定总温、总压和气流角, 分别为标准大气温度、标准大气压和轴向进气; 出口边界条件给定轮毂处静压, 其它径向位置静压由径向平衡方程得到. 湍流模型采用 B-L模型.

图 1和图 2分别是优化前后的流量-压比和流量-效率特性线对比. 表 1列出了优化前后近峰值效率点转子性能对比. 从图 1、图 2和表 1可以看出, 优化后转子性能得到了较大的提高, 在最高效率点处流量相当的情况下, 总压比提高了 7.69%, 效率提高了 1.92%.

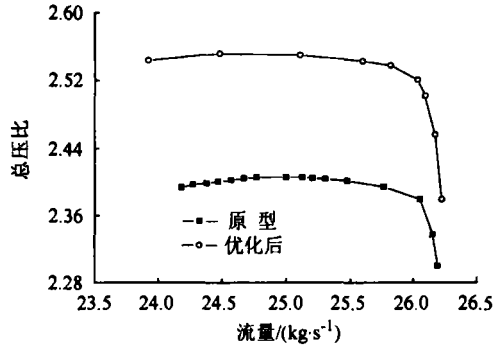

图 1 优化前后流量-压比特性对比

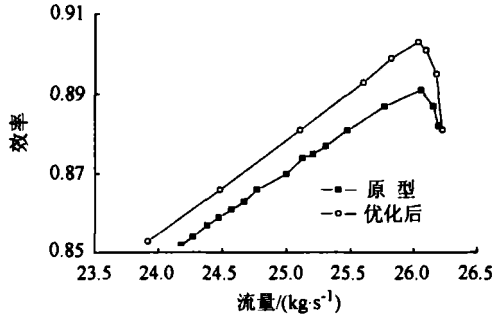

图 2 优化前后流量-效率特性对比

表 1 近峰值效率点性能参数对比

模型	压比	效率/%	流量/(kg·s⁻¹)
原型	2.34	88.6	26.05
优化后	2.52	90.3	26.03

图 3~图 5分别是优化前后叶根、叶中和叶尖的叶型对比. 可以看出主要是叶中区叶型弯角加大, 使气流转角增大从而加功量增大.

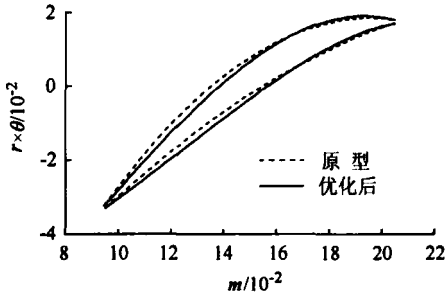

图 3 优化前后叶根叶型对比

4.2 *BVF* 诊断对比分析

下面主要从观察 BVF分布变化这个角度, 来揭示性能得到提升的内在原因.

传统对叶片表面的诊断方法有观察静压分布和极限流线等方法. 叶片表面静压分布一般都变化平缓, 通过观察它得不到更多有用的信息. 观察极限流线虽然可以看出某些关键区域如激波位置, 但很难确定这些关键区域的范围大小.

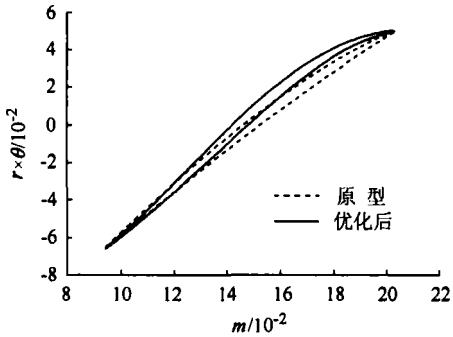

图 4　优化前后叶中叶型对比

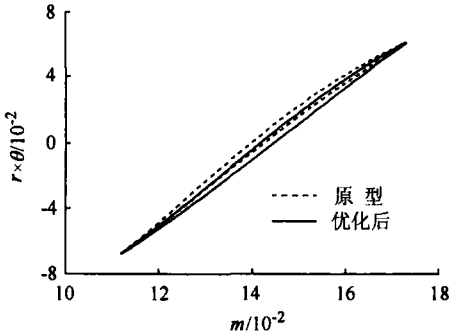

图 5　优化前后叶尖叶型对比图

然而, 观察 BVF的分布情况却完全不同. 图 6为原型在近峰值效率工况下吸力面 BVF分布, 从这个图上可以得到更丰富的信息. 首先, BVF的峰值在前尾缘区域会出现, 尤其是叶根和叶尖的前尾缘处; 其次, 叶片中间的正峰值区域反映的正是激波的位置. 同时我们可以清晰的看出激波处的峰值范围大小. 通过 BVF诊断能显示出静压分布所显示不出的关键区域, 能揭示出影响流场流动品质的物理根源. 从轴向力矩表达式式 (5)可以得知 BVF正峰值区域的出现对加功是不利的, 正峰值的出现说明此处逆压梯度过大 (如激波位置处), 导致产生的边界涡量流较大. 而逆压梯度过大对流场是不利的, 往往导致流动分离, 所以优化的目的是减小正峰值区域的峰值和面积.

如图 7所示为优化后的 BVF分布, 与图 6相比, 激波处 BVF正峰值区域的峰值和面积明显减小, 而且反映出的激波位置后移, 激波结构发生了变化. 由于激波处产生较大涡量流的区域面积减小, 使向流场内部扩散的涡量减少, 从而改善了流场的流动品质. 对跨声风扇转子来说影响流场最关键的是激波处的 BVF分布, 所以应重点关注, 从这个角度来说 BVF的分布得到了明显改善. BVF分布的改善带来的直接效果是流场流动品质的改善和转子性能的大幅提升.

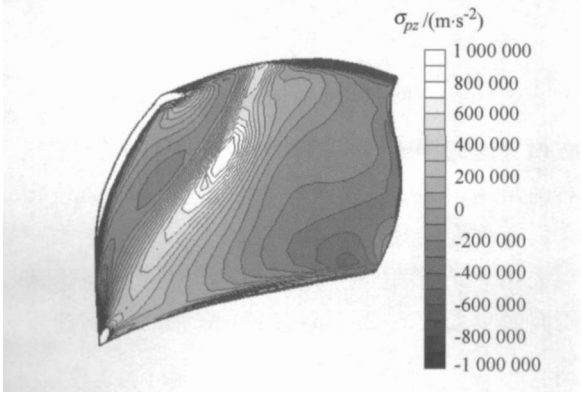

图 6　原型近峰值效率点吸力面 BVF分布

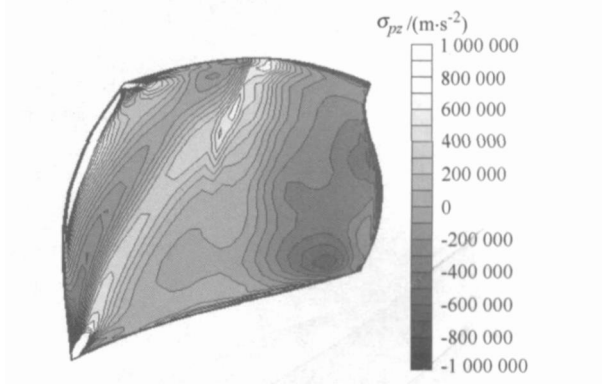

图 7　优化后近峰值效率点吸力面 BVF分布

图 8为优化前后叶中流场相对马赫数分布, 可以看出优化后多道斜激波代替了正激波, 激波强度明显减弱, 这有利于叶片后面段的加功. 图 9为优化前后近叶尖流场相对马赫数分布对比, 可以看到激波变斜, 强度减弱, 激波位置更靠近槽道内部, 激波后分离区也明显地减小. 以上这些都验证了流场品质得到改善的事实, 且表现出的激波结构与 BVF诊断的结果相一致.

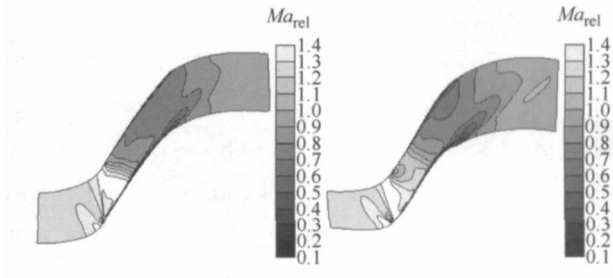

图 8　优化前后叶中流场相对马赫数分布

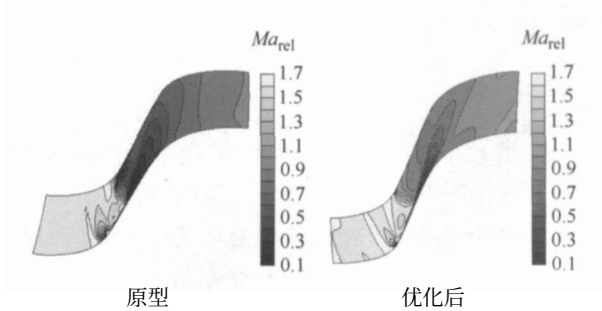

图 9　优化前后近叶尖流场相对马赫数分布

(下转第 **26**页)

参考文献 (References)

[1] Denton J D. Loss of turbomachinery [R]. ASME 90-GT-435, 1990

[2] Storer J A, Cumpsty N A. Tip leakage flow in axial compressor [R]. ASME 90-GT-127, 1990

[3] Shun Kang, Hirsch C H. Experimental study on the three dimensional flow within a compressor cascade with tip clearance part I—— velocity and pressure fields[R]. ASME 92-GT-431, 1992

[4] Shun Kang, Hirsch C H. Experimental study on the three dimensional flow within a compressor cascade with tip clearance part II—— the tip leakage vortex[R]. ASME 92-GT-432, 1992

[5] Kang S, Hirsch C H. Tip leakage flow in linear compressor cascade [J]. J Turbomachinery, 1994, 116: 657-664

[6] Bonhommet-Chabanet C, Gerolymos G A. Analysis of tip leakage effects in a high subsonic annular compressor cascade [R]. ASME 98-GT-195, 1998

[7] Sbardella L, Sayma A I, Imregun M. Semi-unstructured mesh generator for flow calculations in axial turbomachinery blading [J]. Journal for Numerical Method in Fluids, 2000, 32(5): 569-584

(责任编辑: 张 嵘)

(上接第 17页)

5 结 论

本文通过控制叶片表面 BVF 分布使跨声风扇转子性能得到了较大提高. 特性对比表明, 全工况范围性能都明显提升, 在近峰值效率点处, 流量相当, 压比提高了 7.69%, 效率提高了 1.92%. 从中可得出以下结论:

1) 与观察静压分布等传统诊断方法相比叶片 BVF 诊断可以得到更丰富的信息, 能捕捉到不良流动的物理根源.

2) BVF 诊断对比表明, 优化后叶片 BVF 分布明显改善, 造成不良流动的物理根源得以抑制, 带来的直接效果是流场流动品质改善. BVF 诊断分析揭示了转子性能得到提升的内在原因.

3) 结合 BVF 诊断的优化手段对提高风扇/压气机负荷及效率有很大的作用.

致谢 特此感谢北京大学吴介之教授提供的理论指导, 并感谢国家自然科学基金 (10577002) 和北京大学工程研究院的资助.

参考文献 (References)

[1] Jameson A. Optimum aerodynamic design using CFD and control theory[R]. AIAA-95-1729, 1995

[2] Wu J Z, Roach R L, Lo C F, et al. Aerodynamic diagnostic and design based on boundary vorticity dynamics[R]. AIAA-99-3103, 1999

[3] Chung June, Lee Ki D. Shape optimization of transonic compressor blades using quasi-3D flow physics[R]. ASME 2000-GT-489, 2000

[4] Burguburu S. Numerical optimization of turbomachinery bladings [R]. ASME GT-2003-38310, 2003

[5] Merchant Ali, Kerrebrock Jack L, Adamczyk John J, et al. Experimental investigation of a high pressure ratio aspirated fan stage[R]. ASME GT-2004-53679, 2004

[6] Lighhill M J. Introduction: Boundary layer theory[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1963: 46-113

[7] 李秋实, 郭明. 基于局部动力学的一个低速压气机诊断与设计[J]. 自然科学进展, 2005, 15(2): 221-228
Li Qiushi, Guo Ming. Diagnostic and design approach of axial compressor based on local dynamics[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(2): 221-228(in Chinese)

(责任编辑: 彭 徽)