

# 整机环境下的风扇/增压级叶片气动优化

陈志鹏, 袁 新

(清华大学 热能工程系 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:**采用自主研发的三维粘性气动优化设计平台对某双涵道风扇/增压级进行了气动设计优化;采用 NURBS 技术对该风扇/增压级各排叶片进行了参数化造型,包括二维叶型的参数化表达以及基迹线的弯、扭联合造型;采用 NUMECA 商用软件进行了风扇/增压级三维内外涵联算作为气动性能评估指标;基于该风扇/增压级三维内外涵联算,采用 iSIGHT 优化软件对风扇/增压级各排叶片进行了气动优化设计。在整机流量降低 0.342 8% 的情况下,内涵增压级效率提高了 1.43%;对风扇优化,在整机流量基本不变的情况下,整机效率提高了 1.566%,并扩大了增压级的稳定工作范围。

**关 键 词:**风扇/增压级; NURBS; 参数化造型; 多级联算; 优化设计

中图分类号: TK474.7 文献标识码: A

## 引 言

压气机作为现代发动机的核心部件,在气动设计时需要满足高压比、高通流能力、高效率的要求。目前,压气机设计在多级高压压气机的级间匹配和全工况下性能优化存在较大困难,传统的设计方法更多的是依靠设计者的经验,经过多次设计和修正,存在一定的局限性。

随着计算机技术的高速发展,将现代优化算法与三维粘性流场数值求解相结合的方法应用于叶轮机械叶片气动优化设计已经能够实现,国内外在叶型参数化建模和选用适当的现代优化方法结合 CFD 解法对压气机叶片进行优化已经取得一定成果<sup>[1~3]</sup>。

从解决多级轴流式压气机三维粘性气动优化设计方案的若干难题入手,采用基于计算机图形处理技术、全三维粘性流动的数值分析技术和现代优化技术,研究和发展了一整套用于多级轴流式压气机叶片设计的三维粘性气动优化设计系统<sup>[4]</sup>,在整机计算的基础上对某双涵道风扇/增压级进行叶片优

化。

## 1 叶片三维造型技术

在叶片的三维气动优化设计中,需要对叶型进行参数化表达。针对叶型设计而言,以下几点非常关键<sup>[5]</sup>:

(1) 参数化表达应该有足够的灵活性,从而为叶型设计提供足够多的可能性。

(2) 为了减少计算量,需要尽可能地减少设计变量的数目。

(3) 在流动特性对叶型的微小变化很敏感的部分,需要采取更高的精度和曲线光顺的措施。

(4) 为了更好地控制边界层发展,需要叶片型线曲率的光滑分布(叶片型线曲率导数连续),这就造成叶型需要用 3 次以上连续可导的参数表示。

(5) 叶型的参数表达应与直观的几何特性建立很好的映射,以便对叶型设计提供指导。

NURBS 强大的造型功能对于以上叶片设计的要求都是可以满足的。

根据叶轮机叶片的特点,选用了两条四阶 3 次 NURBS 曲线分别对叶片压力面和吸力面进行拟合。NURBS 曲线生成程序用 MATLAB 来编写,拟合算法由软件 iSIGHT 8.0 来实现。

拟合出来的压气机叶片如图 1 所示。

对叶片二维型面进行控制的同时,也加入了 NURBS 对叶片基迹线进行参数化表达的方法,从而在优化过程中不但能对叶型进行改变,而且能够实现叶片弯、倾、掠、扭的控制,这种通过基迹线变化来减少流动损失的方法已经在理论上得到验证,工程上也有所运用<sup>[6]</sup>。考虑到叶片强度等约束条件,仅进行叶片的弯扭联合变换,图 2 和图 3 为叶片分别进行弯曲变换和扭转变换的造型示意图。

收稿日期: 2008-01-08; 修订日期: 2008-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50676043); 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2007CB210108)

作者简介: 陈志鹏(1980-)男,福建厦门人,清华大学博士研究生。

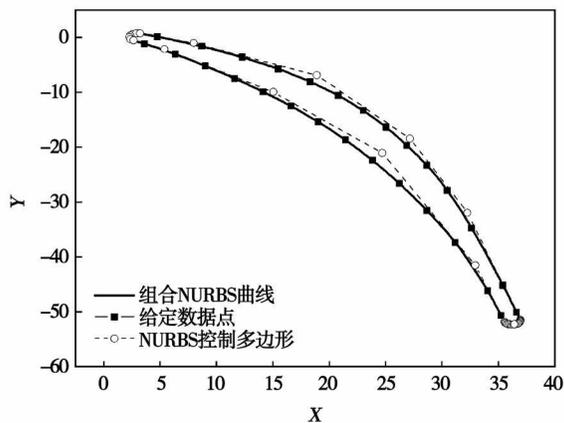


图1 NURBS 曲线拟合压气机叶片截面

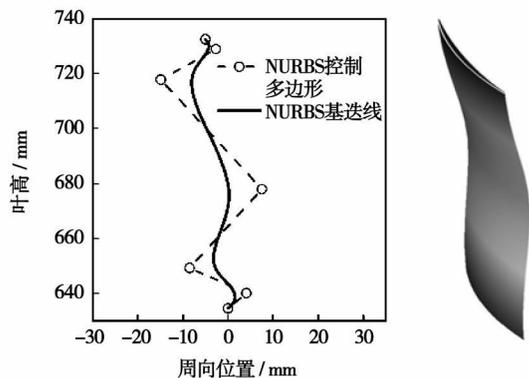


图2 叶片的弯曲

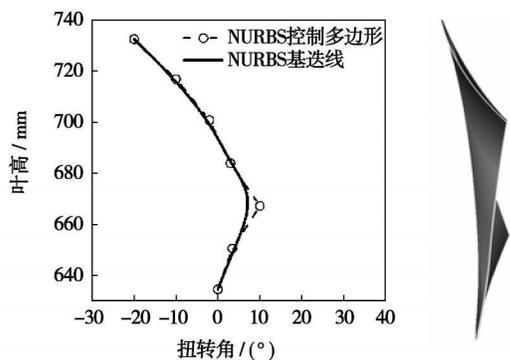


图3 叶片的扭转

## 2 某压气机风扇/增压级内外涵联算

当前,大量的压气机优化是对单排叶片的优化,整机或者多级的压气机优化设计很少。这是因为多级叶轮机械的整机正问题求解是非常耗时的,单排叶片优化设计后必然会引起出口参数的变化,在整机情况下影响到下游的流动特性,使得优化设计的结果可靠性大大降低。本文的优化设计是在整机三维粘性流场数值模拟的基础上进行的,目的就是为

了能准确评价优化设计对整机性能的影响效果。

图4是风扇/增压级三维内外涵联算计算网格的示意图,利用商业软件 NUMECA 提供的 IGG AUTOGRID 网格生成模块自动生成三维计算网格,风扇和内涵增压级叶片均采用 HOH 型网格,外涵导叶采用 H 型网格,考虑到优化实验的时间成本,优化实验采用两套相同拓扑结构的粗细网格,粗网格总数约为 1 000 000,细网格总数约为 8 000 000,优化过程采用粗网格计算,优化结果采用细网格校验。从图中可以看出,在风扇后,内、外涵进口前增加一个名为 block 的包含分流环的网格块,划分这个网格块的目的是为了

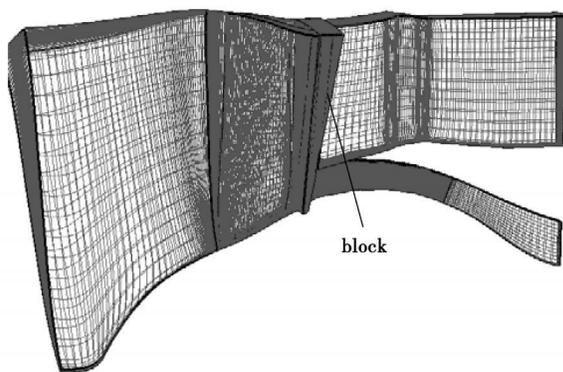


图4 风扇/增压级三维内外涵联算计算网格示意图

计算采用的基本方程为三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程,湍流模型为 Spalart-Allmaras 方程模型。边界条件为:进口边界上给定总温、总压、气流角的分布;出口边界上给定某一径向位置处的静压,出口其它径向位置处的压力利用径向平衡方程确定。工质假定为理想气体,空间离散格式采用中心差分格式,计算过程中动静叶采用纵排守恒连接,并采用多重网格来加速收敛。

## 3 增压级内涵道叶片优化设计实验

该优化设计实验的目的是通过对增压级内涵道叶片三维造型的优化设计,提高增压级气动效率,同时保持整机流量和压比不能有太大变化,因此优化过程选取增压级气动效率为目标函数,将整机流量作为约束条件,限定流量变化在 ±0.5% 以内。

径向基迭线利用 NURBS 样条参数化建模,控制叶片基迭线弯曲变化采用一条 7 个控制点的四阶 3 次 NURBS 曲线进行表达。叶根的控制点保持不动,

叶顶的控制点不作沿叶高方向的移动, 以保持曲线沿叶高方向的投影长度和叶高相同。对所有静叶和进口导叶采取弯曲和扭转变换, 弯曲范围取  $\pm 5$  mm, 扭转角度变化范围取  $\pm 5^\circ$ ; 考虑到动叶强度问题, 仅对其进行扭转变换, 扭转角度变化范围取  $\pm 5^\circ$ 。控制基线变化的控制点不沿径向移动, 因此基线设计变量一共是  $9 \times 7 + 5 \times 6 = 93$  个。为保证叶片强度, 我们限制了叶片二维叶型沿展弦方向叶厚分布不变, 优化设计参数仅取前尾缘的构造角, 因此叶片二维叶型设计变量为  $2 \times 9 \times 7 = 126$  个, 优化涉及的设计变量总数一共为  $93 + 126 = 219$  个。

优化算法选用 ASA, 针对 219 个设计变量, 优化的步数为 526 步。在并行机上进行计算, 单步运算时间约为 30 min。因此优化所耗费时间为  $526 \times 30 = 15\,780$  min。

经细网格计算校验, 优化后的最优点较原始点效率有 1.43% 的提高, 但考察其它性能参数后发现整机流量降低了 0.342 8%。

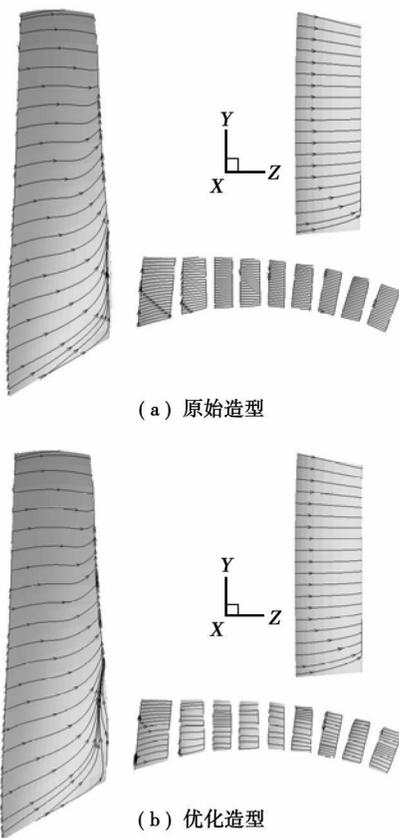


图 5 内外涵叶片表面限制流线比较

图 5 为原始造型和优化造型内外涵叶片表面限制流线比较。从图中可以看出, 无论是原始造型还是优化后造型, 在风扇吸力面接近尾缘处都出现了

一定程度的分离再附现象, 在内涵进口高度上尤为明显。这可能是由于风扇和内涵进口导叶不是非常匹配造成的, 因此, 考虑对风扇进行优化, 通过减小风扇吸力面尾缘处的分离再附来实现整机气动效率的提高。

#### 4 风扇叶片优化设计实验

上述提到每个风扇/增压级内外涵正问题计算耗时为 30 min, 为了减少优化所需要的时间, 仅对风扇的出口构造角进行优化设计, 采用一条 7 个控制点的四阶 3 次 NURBS 曲线, 对风扇沿叶高方向的出口构造角变化进行表达, 这样造型变换仅需要 7 个设计变量。同增压级内涵道叶片优化设计实验不同, 选取整机的气动效率作为目标函数, 优化算法选用 ASA, 针对 7 个设计变量, 优化的步数为 350 步。

经细网格计算校验, 优化后的效率最优点较原始点整机气动效率有 1.985% 的提高。

为了综合考虑优化设计对压气机性能的影响, 同时对优化后的流量和压比变化进行限制, 使流量和压比尽量接近原始设计值, 在这个标准下, 所选取的综合最优造型整机气动效率提高为 1.566%, 表 1 给出了这 3 种造型下的气动效率、总流量和总压比变化。

表 1 3 种设计造型性能比较

	效率/%	流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	总压比
原型	—	—	—
综合最优	1.566	0.08	0.003 1
效率最优	1.985	-2.15	-0.001 1

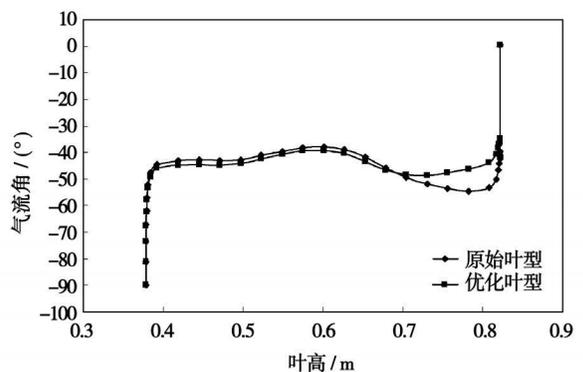


图 6 设计工况点出口气流角比较

图 6 为设计工况点出口气流角比较, 从图中可看出, 优化后的风扇出口气流角在叶顶附近有明显减少, 而在叶根附近略有增大, 叶片中部高度变化不大。

图 7 是原始造型和风扇优化后内涵的全工况性能比较,从图中可以看出优化后除了设计工况点性能提高外,整机的工作区间也有所增大。

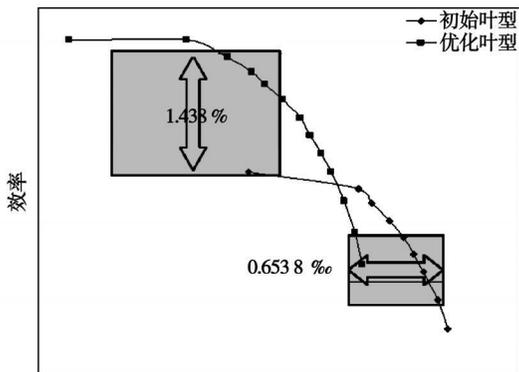
### 5 结 论

在整机三维粘性流场数值模拟的基础上,利用集成了叶片全三维控制模块的叶片粘性气动优化设计平台,采用 ASA 优化算法,对某压气机增压级内涵叶片和风扇进行了优化设计,其中增压级内涵叶片优化后内涵增压级效率提高了 1.43%,但同时整机流量降低了 0.3428%;风扇优化后在整机流量和压比基本不变的情况下,整机气动效率提高了 1.566%,同时扩大了增压级稳定运行区间,达到了叶片自动优化设计的目的。

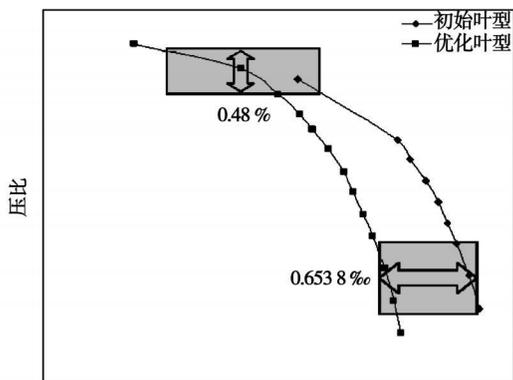
### 参考文献:

- [ 1 ] 周正贵. 高亚声速压气机叶片优化设计[ J ]. 推进技术, 2004, 25 (1): 58—61
- [ 2 ] SANGER N L The use of optimization techniques to design controlled diffusion compressor blading[ J ]. ASME J Eng Power, 1983, 105: 256—265
- [ 3 ] BURGUBURU S, BONHOMME C, TOUSSAINT C, et al Numerical optimization of turbomachinery bladings[ J ]. ASME Turbo Expo. 2003, 6B: 1123—1133
- [ 4 ] 高学林, 袁 新. 叶轮机械全三维粘性气动优化设计系统[ J ]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 88—92
- [ 5 ] 陈 波, 袁 新. 基于 NURBS 三维造型的粘性气动最优化设计技术[ J ]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 764—766
- [ 6 ] 王仲奇. 叶轮机械弯扭叶片的研究现状及发展趋势[ J ]. 中国工程科学, 2000, 2 (6): 40—48

(编辑 伟)



(a) 流量-效率特性线



(b) 流量-压比特性线

图 7 全工况性能比较

新技术、新工艺

## 高压汽包锅炉的运行清洗

据《Элект Рические станции》2007 年 4 月号报道,利用无机酸清洗锅炉受热面,其清洗效果非常好,同时,在高于正常的单位污染度下更是这样。

使用浓度从 7%~7.5%到 10%~11%的硫酸溶液,在约 60℃温度情况下,持续时间为 6~8 h 进行高压汽包锅炉运行的化学清洗,能保证有效地除去沉积物,除去量从 400~900 g/m<sup>2</sup>。

为了定期地混合并同时加热酸溶液(以及在中和处理阶段,混合并加热碱溶液),可以使用低位蒸汽。

(吉桂明 供稿)

Thermal Energy & Power. - 2009,24(1). - 31 ~ 36

From the standpoint of coupling of non-steady flow with elastic blade vibration, studied was the forced response of blades, which is of major significance for the high-cycle fatigue of blades. By using commercial programs CFX and ANSYS, a fluid-solid coupling calculation was performed of the last stage of a steam turbine at its design status with a passage-inside flow chart and blade vibration stress at a given damping level being obtained. A contrast analysis of the flow field unsteady calculation results with those under uncoupled conditions was conducted. It has been found that the coupled vibration and deformation exercise a relatively small influence on the time-averaged load of blades, but there exists a remarkable influence on the unsteady mutual reaction between the stator and rotor. **Key words:** fluid-solid coupling, steam turbine, forced response, non-steady flow

整机环境下的风扇/增压级叶片气动优化 = **Aerodynamic Optimization of a Fan/Booster Stage Blade in an Overall Engine Environment**[刊,汉]/ CHEN Zhi-peng, YUAN Xin (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Sciences and Power Engineering, Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009,24(1). - 37 ~ 40

A dual ducted-fan/booster stage was aerodynamically designed and optimized by adopting a self-developed three-dimensional viscous aerodynamic-optimized design platform. Each row of blades in the fan/booster stage underwent a parameterized modeling by employing NURBS technology, including a parameterized expression of two-dimensional blade profiles and a skew-and-twist combined modeling of base superimposition lines. Commercial software NUMECA was used to perform a three-dimensional calculation of both inner and outer ducts of the fan/booster stage, the calculation results of which serve as an index for evaluating the aerodynamic performance. Based on the three-dimensional calculation of both inner and outer ducts of the fan/booster stage, optimization software iSight was adopted to perform an aerodynamic design optimization of each row of blades in the fan/booster stage. Under the condition that the whole engine flow rate has decreased by 0.3428%, inner-duct booster stage efficiency went up by 1.43%. With fan optimization and under the condition of the flow rate of the machine being kept basically unchanged, the overall efficiency has increased by 1.566% and the stable operation scope of the booster stage, expanded. **Key words:** fan/booster stage, NURBS (Non-Uniform Rational B Spline), parameterized modeling, multi-stage calculation, optimized design

小轴向间隙下直、弯静叶 Clocking 效应的实验研究 = **Experimental Study of the Clocking Effect of Straight and Bowed Stationary Blades at a Small Axial Clearance**[刊,汉]/ LU Hua-wei (College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, Post Code: 116026), GUO Shuang, CHEN Fu, WANG Zhong-qi (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009,24(1). - 41 ~ 46

Experimentally studied was the clocking effect of a low-speed compressor compound stage adopting both straight and bowed stationary blades at a small axial clearance and investigated was the mechanism influencing the flow status inside the compressor under such a clearance. It has been found that when the axial clearance between the rotating and stationary blades decreases to 67% of the prototype clearance, the overall compressor efficiency will somehow increase compared with that of the prototype. Moreover, the growth margin of the compressor efficiency by using directly-bowed stationary blades exceeds that in the case of using straight ones. The efficiency increase brought about both by using various blade profiles and from the clocking effect can maximally reach 1.8% to 1.9% at the design operating condition while it can be as high as 2.8% at the maximal flow rate. The maximal efficiency point at the design operating condition occurs when the wake of the first-stage stationary blades coincides with that of the second-stage ones. The lowest efficiency point corre-