

文章编号: 1000-8055(2008)10-1908-05

跨声速轴流压气机叶片周向弯曲的数值优化

张晓东, 吴 虎, 黄 健, 马聪慧
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 采用优化软件 ISIGHT 作为平台, 集成了三维粘性流计算软件 NUMECA 和轴流压气机叶片造型程序, 建立了一套叶轮机械气动性能优化系统. 针对跨声速轴流压气机动叶和静叶的周向弯曲进行了优化. 结果在整条特性线上, 该级压气机的效率和压比都得到了不同程度的提高, 充分验证了该叶轮机械气动性能优化系统的可靠性. 同时表明转子的尖部反弯可以有效地减小叶尖间隙的横向流动.

关 键 词: 数值优化; 弯曲动叶; 轴流压气机

中图分类号: V231

文献标识码: A

Numerical optimization of transonic axial compressor by bowed blades

ZHANG Xiao-dong, WU Hu, HUANG Jian, MA Cong-hui

(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A compressor automated optimization system was investigated, which composed of software ISIGHT, NUMECA and a sophisticated blade-design program. For testing its validity, a single-stage transonic compressor was optimized by changing circumferential stacking line of blade. The results show efficiency and pressure ratio is improved in whole characteristic curve; the investigation indicated the negative bow of rotor tip can improve flow structure and validated the compressor automated optimization system.

Key words: numerical optimization; bowed rotor; transonic axial compressor

端壁损失一般占叶轮机械整体损失的 1/3 以上. 长期以来国内外学者针对端壁损失的控制进行了大量的研究. 叶片的弯曲就是近年来取得的一大成果, 针对叶片弯曲的数值优化也成为当今叶轮机械设计领域的研究热点. 它可以有效地减小叶片端壁损失, 特别是静子的弯曲, 在亚声速轴流压气机和涡轮上已经得到了实际的应用. 哈尔滨工业大学苏杰生、王仲奇教授等人已在这方面做了大量的研究, 取得了显著的成果. 但对于弯曲叶片在跨声速压气机上的应用研究并不多见. 文献[1]用响应面法对跨声速压气机的静叶进行了弯曲优化, 效率和压比都得到了较大的提高. 文献[2]用梯度法对 Rotor 37 进行了弯曲优化, 在压

比基本不变的条件下绝热效率提高了 0.59%. 文献[3]从流动机理上研究了叶片的弯掠, 文献[4]用差分式遗传算法对叶型和叶片的弯曲同时进行了优化, 文献[5]用并行机对多级压气机进行了叶片弯曲优化. 本文采用软件 ISIGHT 集成了 NUMECA 和一个叶片造型程序, 建立起一套叶轮机械气动性能优化系统, 同时针对跨声速压气机动叶和静叶的周向弯曲进行了优化设计, 优化结果证实了该优化系统的可行性, 可以作为工程设计的一种优化设计手段.

1 优化系统的构建

如图 1 所示, 整个优化系统由叶片造型模块、

收稿日期: 2007-09-18; 修订日期: 2008-03-19

作者简介: 张晓东(1984-), 男, 宁夏吴忠人, 硕士生, 主要从事压气机设计及内流结构方面的研究.

网格生成模块、性能评价模块和优化模块构成。其中优化软件 ISIGHT 作为优化系统集成的平台,同时也提供了优化算法。

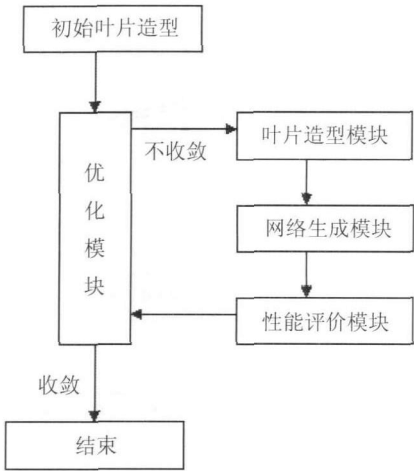


图 1 优化系统流程图
Fig. 1 Flow chart of optimization

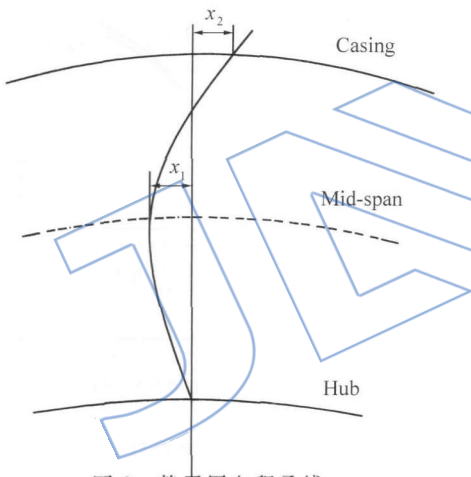


图 2 静子周向积叠线
Fig. 2 Stacking line of stator

1.1 叶片造型模块

叶片的参数化造型是优化的关键,它要求能用最少的参数来获得叶片优化需要的变化空间,如果参数选取不好很容易导致优化不成功。文中对转子和静子叶片的周向弯曲进行了优化。

转子叶片形状由 13 个截面叶型确定。优化中保持各个截面叶型形状不变,选取周向移动参数为优化对象。根部截面保持不动,选取其余排列序号为奇数的 6 个截面作为优化参数,排列序号为偶数的 6 个截面的周向移动参数由前面 7 个截面的周向移动距离样条插值得出。

静子叶片的周向积叠线由一段贝赛尔曲线构成,保持根部截面不动,如图 2 所示,积叠线由根

部截面,中间截面,顶部截面的 S_3 流面坐标确定的一段贝赛尔曲线。选取中间截面和尖部截面的周向移动距离为优化变量。

所以共有 8 个设计变量确定转子和静子的周向移动距离。这样做可以保持叶型形状不变,而单独研究叶片周向弯曲的影响。这部分工作由一个 FORTRAN 程序的可执行文件完成。

1.2 优化模块

目前,遗传算法、神经网络等方法已成功应用于叶轮机械的气动优化当中,特别是对于非线性多目标优化具有独特的优势。但由于其优化周期过长,一般采用并行计算或近似模型来减少优化设计时间。尽管如此,对于设计参数较多的优化还是显得无法满足工程要求。处于时间上的考虑,本文选择 ISIGHT 中的二次规划(NOPQL)对绝热效率进行单目标优化。此优化算法是基于梯度分析的一种直接优化算法,它能快速地根据梯度信息找出局部最优解,可以用在非线性优化中,也是常用的优化算法之一。优化中各变量的变化范围如表 1 和表 2 所示,其中 t 表示栅距。

表 1 转子优化参数的约束

Table 1 Restriction of rotor optimization parameter

变量	$X(1)/t$	$X(2)/t$	$X(3)/t$
周向移动量	- 0.2~0.2	- 0.3~0.3	- 0.4~0.4
变量	$X(4)/t$	$X(5)/t$	$X(6)/t$
周向移动量	- 0.3~0.3	- 0.2~0.2	- 0.1~0.1

表 2 静子优化参数的约束

Table 2 Restriction of stator optimization parameter

变量	$X(7)/t$	$X(8)/t$
周向移动量	- 1.0~1.0	- 1.0~1.0

1.3 网格生成模块

网格生成由 AUTOGRID/ NUMECA 完成。本文采用 HOH 型网格;转子叶尖间隙设定为 1.016 mm (0.04 inch);网格数为 41(周向) ×49(展向) ×261(周向)对一级压气机进行网格生成,离开壁面第一层网格的 $y^+ < 7$ 。这样的网格水平选取比较中庸,既能捕捉到流动细节,又能较快地做出评价,比较适合优化设计。需要注意的是,在优化过程中网格生成都是按照一个固定的模板文

件进行的,因此在优化之前要选取好各个优化参数的变化范围,这样才能保证在优化过程中,网格质量能满足计算的要求.表1中给出了本优化中各个参数的变化范围,在这个优化空间内,可以保证最小网格正交度大于10,同时满足优化所需的变化空间.

1.4 性能评价模块

采用三维粘性流计算软件 FINE/NUMECA 中的 Euranus 完成目标值的计算.数值计算中采用 Jameson 的有限体积中心差分格式,流动方程为雷诺平均 N-S 方程,湍流模型采用 Spalart-Allmaras 方程.动静叶排交界面采用混合平面模型.同时采用当地时间步和多重网格法来加速计算收敛.边界条件分别为进口给定总温、总压,以及进口气流角,出口给定静压,残差设定为 5.5.计算收敛时,性能参数通过对 Euranus 的计算结果文件的解析得到,本文仅针对一级压气机的效率进行优化.

2 优化设计算例

为了验证气动优化系统的可靠性和研究叶片周向弯曲对压气机性能的影响,本文对一级跨声速压气机针对绝热效率进行了单目标优化.该级压气机由 28 个叶片组成和 46 个静子叶片组成,转速为 $10\,720\text{ r/min}$,转子进口处的轮毂比为 0.4;展弦比为 2.48;稠度在 1.33 左右;静子进口处的轮毂比为 0.51;展弦比为 2.75;稠度在 2.52 左右.压气机设计点流量为 83.5;压比为 1.744;效率为 0.854,进口相对马赫数 0.8~1.4.

优化是在确定的单个工作点进行的单目标优化,因此有必要对优化前后的特性线变化进行分析,图3和图4分别给出了优化前后压比和效率随流量的变化,从特性线上可以看出,经过优化后压比和效率沿特性线都有不同程度提高.优化过程中给定了出口静压,此时优化点的流量在 83.3 kg/s 左右变化,优化后绝热效率提高了约 0.63%,压比提高了约 1.2%左右,也是特性线上优化幅度最大的区域;同时特性线上右半段优化效果比较明显,距离优化点较远的左边部分性能提高很小.这表明单点优化的效果与优化点的选取有直接的关系.

图5和图6分别给出了在优化点处压气机总压比和效率沿展向分布图,压比在 10%叶高以上都有明显提高;而效率的提高是在 50%叶高以上部分,从图7和图8上同样可以看出,叶片根部和

尖部反弯,而中间正弯,且叶片上半部分的弯曲程度明显大于下半部分.文献[4]中同样得出转子叶尖的正弯有利于改善转子的性能,不同的是本文对效率优化的同时,压比也得到了明显的提高.

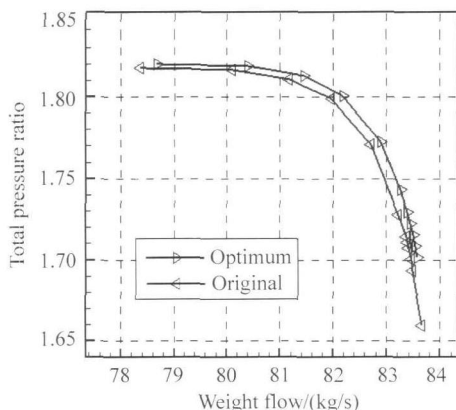


图3 总压比特性曲线

Fig. 3 Characteristic of total pressure ratio

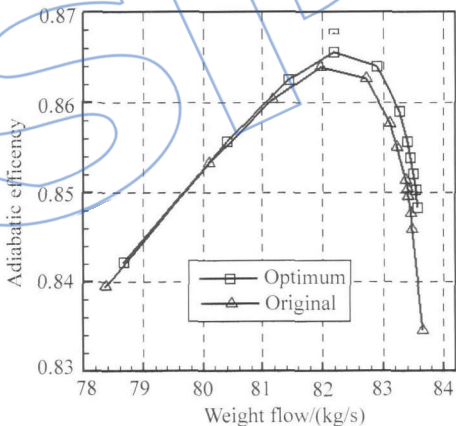


图4 等熵效率特性曲线

Fig. 4 Characteristic of adiabatic efficiency

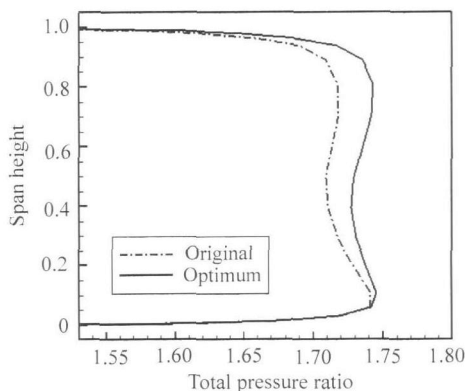


图5 总压比沿展向分布

Fig. 5 Total pressure ratio distribution along spanwise

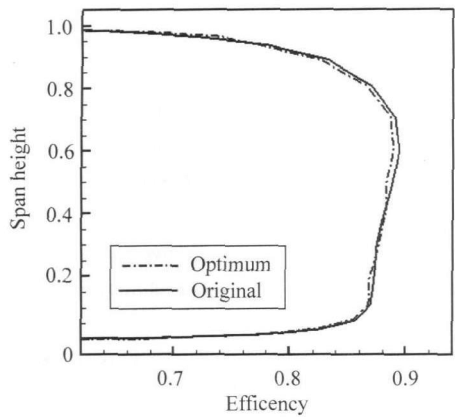


图 6 等熵效率沿展向分布
Fig. 6 Adiabatic efficiency distribution along spanwise

优化后静子的形状变化并不明显,性能的改进主要来自于转子叶片的周向弯曲,如图 7 和图 8 所

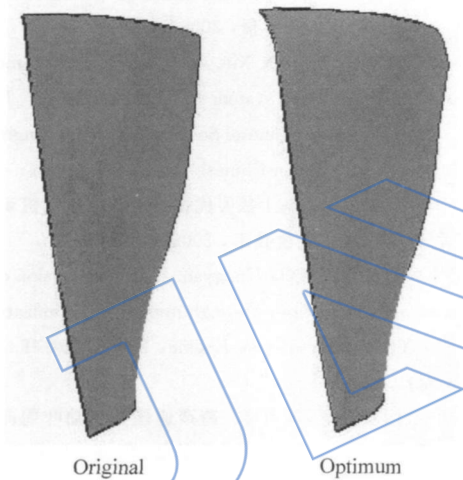


图 7 转子优化前后叶形的变化
Fig. 7 Rotor blade shape variation

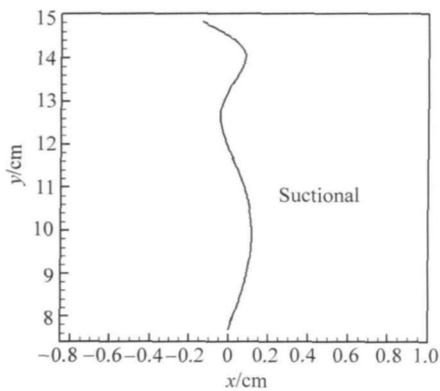


图 8 转子优化后周向积叠线形状
Fig. 8 Optimization rotor stacking line

示.叶尖存在明显的反弯,这与文献[6-7]所结论类似.

如图 9 在 95 %叶高处马赫数分布图所示,优化后转子通道的激波强度有所降低,流场更加均匀.从图 10~图 12 中可以看出优化后转子间隙的横向流动有所削弱,说明转子叶尖的反弯可以有效减小间隙泄漏,从而改善气流流动.

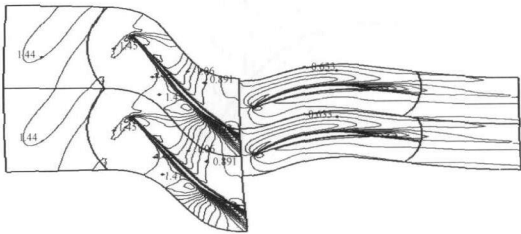


图 9 优化后 95 %叶高处的相对马赫数分布
Fig. 9 Mach number distribution on 95 % blade height after optimization

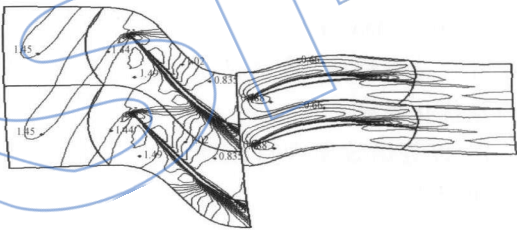


图 10 优化前 95 %叶高处的相对马赫数分布
Fig. 10 Mach number distribution on 95 % blade height before optimization

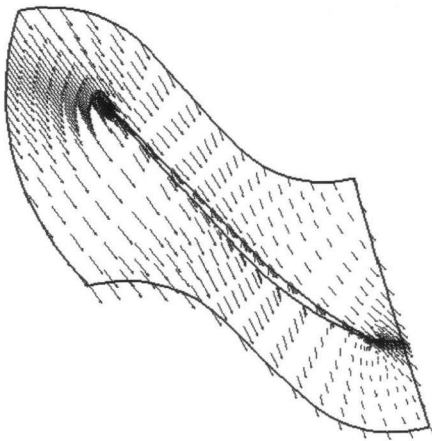


图 11 优化后转子间隙流场
Fig. 11 Rotor clearance flow after optimization

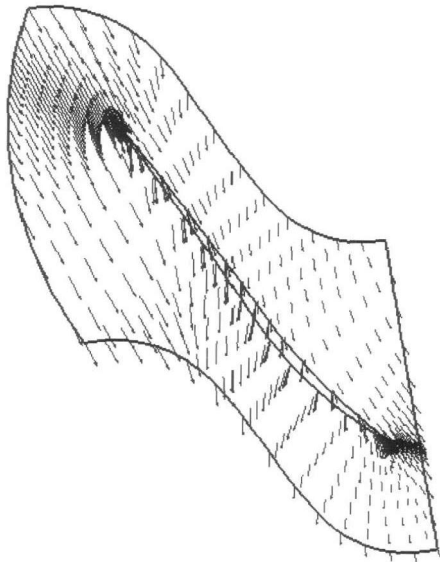


图12 优化前转子间隙流场

Fig.12 Rotor clearance flow before optimization

3 结论与展望

1) 基于 ISIGHT 平台集成了 NUMECA 和一个叶片造型程序,建立起一套叶轮机械叶片造型自动优化系统;

2) 以等熵效率为目标针对叶片的周向弯曲进行单点优化,通过对优化前后特性线分析表明,优化后该级压气机的压比和效率在整条特性线上都有不同程度的提高;

3) 转子叶尖的周向反弯可以减小叶尖间隙的横向流动,有利于改善压气机的性能;

4) 压气机优化是非线性多目标优化问题,本文限于条件采用的二次规划是局部优化方法,这样就限制了优化的潜力,作者下一步将会在这一

方面做出改进.

参考文献

- [1] Jang C M, Kim K Y. Optimization of stator blade using response surface method in a single-stage transonic axial compressor [J]. Power and Energy, 2005, 219 (8): 595-603.
- [2] LIAN Yongsheng. Multi-objective optimization of a transonic compressor blade using evolutionary algorithm [R]. AIAA 2005-1816.
- [3] Amano R S, Xu C. Blade sweep effects of turbomachinery [R]. AIAA 2005-48.
- [4] 宋立明,李军,丰镇平. 三维跨音速压气机叶栅多目标气动优化设计[J]. 工程热物理学报, 2007, 5: 223-225.
SONG Liming, LI Jun, FENG Zhenping. Multi-objective optimization design of the 3-D transonic compressor cascade [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 5: 223-225. (in Chinese)
- [5] 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, 4: 88-92.
GAO Xuelin, YUAN Xin. Full 3-D viscous aerodynamic optimization design system for turbomachinery [J]. Proceedings of the Chinese Society Electrical Engineering, 2006, 4: 88-92. (in Chinese)
- [6] 伊卫林,黄鸿雁. 基于数值优化的跨音速压气机动叶三维设计[J]. 燃气轮机技术, 2006, 7: 34-38.
YI Weilin, HUANG Hongyan. Three-dimension design of transonic compressor through numerical optimization [J]. The Technology of Gas Engine, 2006, 7: 34-38. (in Chinese)
- [7] 伊卫林,黄鸿雁,韩万金. 跨音速压气机动叶周向弯曲的数值优化设计[J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 480-484.
YI Weilin, HUANG Hongyan, HAN Wanjin. Numerical optimization design of circumferentially curved transonic compressor rotor [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 480-484. (in Chinese)