

文章编号: 1000-8055(2010)06-1381-08

基于多级环境下的双排对转压气机优化设计

王 雷, 刘 波, 梁 俊, 王庆伟
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 以某双排对转压气机为研究对象, 采用三维 Navier-Stokes 方程计算、叶片参数化造型、神经网络构建近似函数、遗传算法寻优相结合的优化方法, 对转子 2 叶片进行级环境下的全三维叶型优化方案探索. 优化目标是在控制流量和压比的情况下, 最大化等熵效率. 优化结果显示, 设计点压气机效率提高 1.5% 左右. 通过流场细微结构分析表明新叶型的气动布局得到合理改善, 转子 2 中, 尖部流场低速区域有所减少, 分离现象有所减弱.

关 键 词: 对转; 压气机; 优化环境; 流场分析

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Optimization of dual stage counter-rotating compressor in multistage environment

WANG Lei, LIU Bo, LIANG Jun, WANG Qing-wei

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

Abstract: With the optimization platform of three-dimensional (3-D) design, the optimization design was carried out for rotor 2 of a two stage counter-rotating compressor in multistage environment based on the methods such as: three-dimensional Navier-Stokes (N-S) flow computation, blade section parameterization, artificial neural networks and genetic algorithm. The optimization objective is to maximize the isentropic efficiency while the mass flow and total pressure ratio are controlled. Numerical results show that efficiency is increased by 1.5% at design point after optimization of rotor 2. The gain in aerodynamic performance is largely attributable to the reduction of losses due to flow separation in suction side, as observed through flow field analysis.

Key words: counter-rotating; compressor; optimization environment;
flow field analysis

航空发动机的发展对压气机部件提出了越来越高的要求, 对转技术作为有效提高发动机性能的技术应运而生. 对转压气机作为新型压气机, 在气动性能与结构设计上与传统压气机相比有着独特的优势^[1-4]. 叶型优化设计作为高性能压气机设计中重要的环节, 长期以来都是国内外学者专家的密切关注研究热点之一. 近年来基于遗传算法

与人工神经网络寻优相结合的新型优化设计方法在叶片优化设计过程中普遍应用. 如何将新型优化方法与对转压气机相结合, 在充分认识其内部流场结构的前提下合理改进气动布局, 是当前对转压气机气动设计中的难点之一.

传统叶型优化一般采用分别对基元级叶型进行优化, 在此基础上对基元级叶型进行三维积

收稿日期: 2009-05-27; **修订日期:** 2009-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(50976093); 863 计划项目(2008AA05Z202)

作者简介: 王雷(1985-), 男, 湖南株洲人, 博士生, 主要研究方向为压气机叶型设计优化.

叠^[5-13]. 其缺陷是很难保证基元级叶型最优与对转压气机整体性能最优的匹配. 与单级环境相比, 多级环境工况点会受某一叶片排制约, 而使其他叶排偏离设计工况点, 叶片排之间的相干效应也会对流场微观组织结构产生重大影响. 在多级环境下优化, 可全面考虑优化叶片排优化后对其余叶片排的影响, 使各排叶片相互匹配得当, 保证整个压气机系统达到最优状态.

本文在上述背景下运用 NUMECA 的 FINE/ Design three-dimensional (3-D), 对轴流式双排对转压气机的第二级转子叶片通过调整中弧

线和积叠形式进行多级环境下的全三维气动优化设计, 对优化前后压气机进行三维流场数值模拟, 为进一步开展对转压气机的流动控制研究提供参考和技术储备.

1 研究对象

本文依托西北工业大学的轴流式双排对转压气机试验台, 运用全三维优化方法对转子 2 进行多级环境下的优化设计, 以改善初始叶型局部流场结构. 该对转压气机在设计点的主要参数如表 1 所示.

表 1 对转压气机设计参数
Table 1 Design parameters of counter-rotating compressor

进口导叶 (IGV)			转子 1 (R1)	转子 2 (R2)	出口导叶 (OGV)	
叶片数	22		19	20	32	
转速/ (r/ min)	0		- 8 000	8 000	0	
设计参数			进口参数			
流量/ (kg/ s)	压比	绝热效率	进口总压/ Pa	进口总温/ K	轴向气流角/ (°)	径向气流角/ (°)
6. 4	1. 22	0. 86	101 325	288. 15	0	0

2 优化前性能计算和流场分析

为了进行优化前后性能的比较, 同时也为了选择合适的优化工况点和优化目标, 本文对优化前的轴流式双排对转压气机的性能进行了全三维计算. 使用 NUMECA 软件包中的 AUTOGRID 模块自动生成 O4H 型网格, 如图 1. 间隙内采用蝶形网格控制网格质量, 网格总数约 130 万. 计算采用 NUMECA 的 FINE/ Turbo 软件包, 用 Jameson 有限体积差分格式并结合 Spalart-Allmaras (S-A) 湍流模型对相对坐标系下的三维

雷诺平均 Navier-Stokes (N-S) 方程进行求解. 空间离散采用二阶精度的中心差格式, 时间项采用 4 阶 Runge-Kutta 方法迭代求解, Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 数取 3. 0. 为了加速收敛, 采用多重网格以及隐式残差光顺方法. 根据 S-A 模型的适应范围设定 y^+ 值为 6, 离开叶片表面第一层网格的距离 10^{-6} m.

计算结果与试验测量值如图 2 所示. 从压比/流量和效率/流量特性分布可以看出数值计算结果与试验结果吻合较好, 压比特性曲线变化趋势一致. 本文试验过程中采用总压比和温度进行效

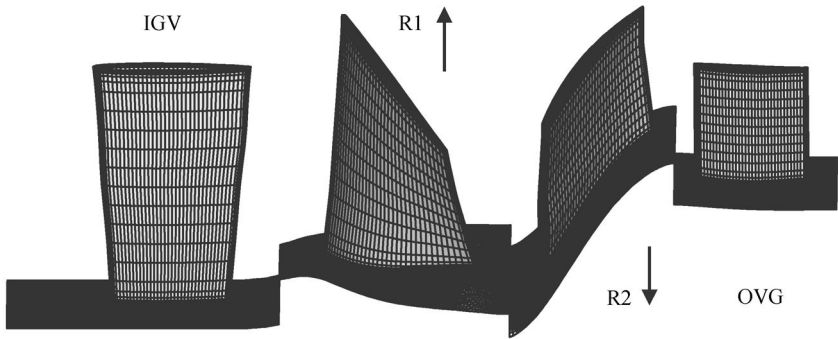


图 1 计算网格三维视图
Fig. 1 Numerical grids in three-dimensions

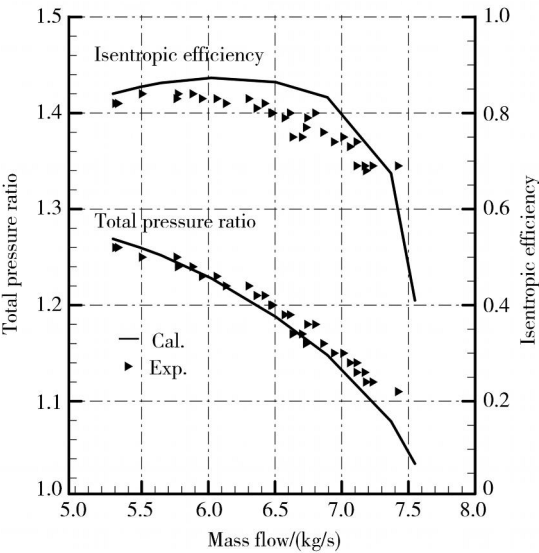


图 2 对转压气机设计转速特性曲线
Fig.2 Performance curve at design speed

率计算,压比通过压力探针获得,温度则通过温度传感器获得.相比之下压比的波动幅度较小,但受变频电机干扰,温度测量的精度受到一定影响变化幅度较大,在试验过程中进口总温采用给定常值的方法,这是试验中效率偏低的原因之一.

试验验证本章计算过程中采用的计算网格、选用的各计算参数设置合理,数值计算结果准确可信.

图 3 和图 4 给出的分别是设计转速下近设计点和近喘点各叶排吸力面流谱图.近设计点下转子 1 吸力面靠近尾缘处极限流线出现汇聚,分离线起始于尾缘 4 %轴向弦长处,之后沿着转子径向向顶部和下游发展.转子 2 和出口导流叶片在近设计点吸力面极限流线分布较为合理,并未发生明显分离.

在喘振边界点处,分离线的位置前移至距尾

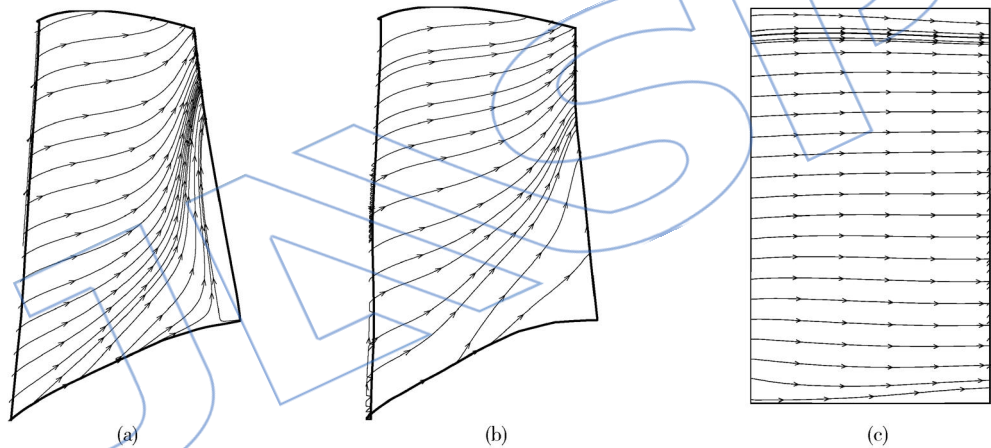


图 3 近设计点转子 1、转子 2 及出口导流叶片吸力面极限流线
Fig.3 Suction streamlines of rotor 1 ,rotor 2 and OGV near design condition before optimization

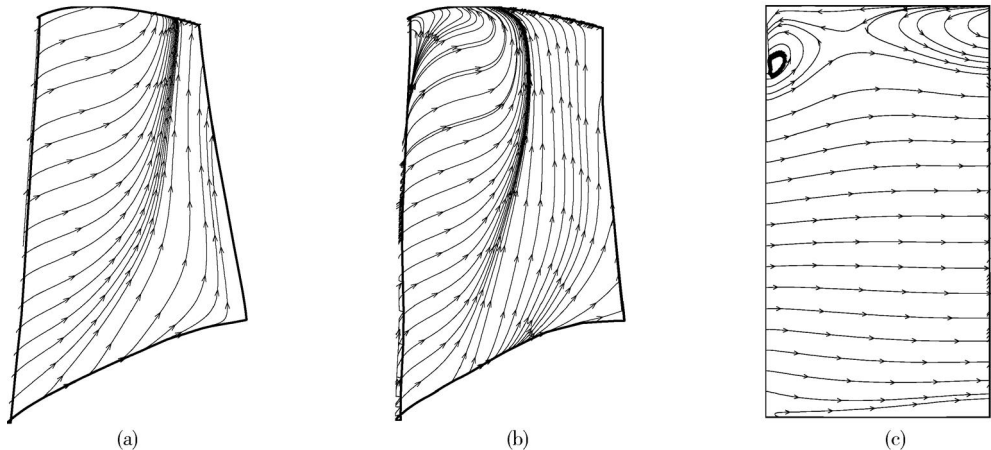


图 4 近喘点转子 1、转子 2 及出口导流叶片吸力面极限流线
Fig.4 Suction streamlines of rotor 1 ,rotor 2 and OGV near stall condition before optimization

缘35%轴向弦长处,且由75%叶展范围扩展到整个叶片高度,由于分离线的阻滞叶片顶部区域呈现较大的径向分量,极大的影响转子1顶部流动状态.转子2叶片吸力面受叶尖间隙流的影响在前缘至40%轴向弦长出现倒流.在位于叶片顶部的角区附近,形成一个旋涡,同时出口导流叶片顶部10%叶展范围内出现大规模倒流现象并在叶片前缘形成一个角涡,流动情况恶化,呈现出强烈的非定常特性,这是由于受转子1出口气流影响,转子2尖部处于大的正攻角条件下工作.转子2尖部吸力面的大面积分离和低能量流团对压气机流道造成一定的阻塞导致有效流通面积减小,是诱导对转压气机失速进而喘振的主要原因.由此可推断出整级对转压气机的流通能力受转子2决定.转子2的设计欠合理处将制约对转压气机整体性能提升,导致两排转子叶片级间匹配未达到最优.为进一步提高对转压气机性能,本文选取转子2叶片进行多级环境条件下的三维优化研究.

3 三维优化方法概述

本文优化过程基于人工神经网络和遗传算法展开.为使优化结果与原始叶型具有可比性,可保持叶型型线不变,并固定轮毂、机匣、前后掠在子午面上的轮廓线不变.通过将4个不同叶展截面处(5%,29%,57%和95%叶展)的叶型进行径向积叠生成三维叶片,本文中选取影响叶片积叠线形式和叶型中弧线的13个变量作为可调自由参数,通过自由变量的随机微扰来寻找满足优化要求的设计叶片,生成85个样本数据库.优化前根据所提供的样本,利用人工神经网络对样本的目标函数值进行拟合.利用遗传算法预测目标函数最优值,并对对应的几何叶型进行流场分析并生成新的样本填充到原始样本中实现循环迭代过程.在迭代过程中近似函数模型越来越精确,不断生成性能更为优异的叶型直至找到最优叶型.叶型优化设计通常属多目标优化问题,Design 3-D中对于多目标问题在罚函数中引入权因子将多目标优化转化成单目标优化,控制寻优方向.本文的优化目标为:在不降低压比和流量的约束下,对转子2的等熵效率进行优化,优化工况选取为压气机近设计点.目标函数的表达式如式(1)所示, $\dot{m}$, h , π 分别为每次迭代计算所得到的最优解. W_1 , W_2 , W_3 分别对应于流量、效率和压比的罚函数的权因子.在本次优化中将 W_2 设为2, W_1 和 W_3 分别取1,即在优化过程中侧重考虑效率因素.为将

罚函数无量纲化,引入 $\dot{m}_{ref}$, h_{ref} , π_{ref} 作为流量、效率和压比的参考值.优化收敛过程如图5所示,经过大约40步迭代,目标函数基本已经收敛.优化前后叶片根、中、尖截面基元级叶型对比如图6所示,可以看出转子2优化后叶型和安装角有较大改动.

$$F = W_1 \left(\frac{|\dot{m}_{opt} - \dot{m}|}{\dot{m}_{ref}} \right)^2 + W_2 \left(\frac{|h_{opt} - h|}{h_{ref}} \right)^2 + W_3 \left(\frac{|\pi_{opt} - \pi|}{\pi_{ref}} \right)^2 \quad (1)$$

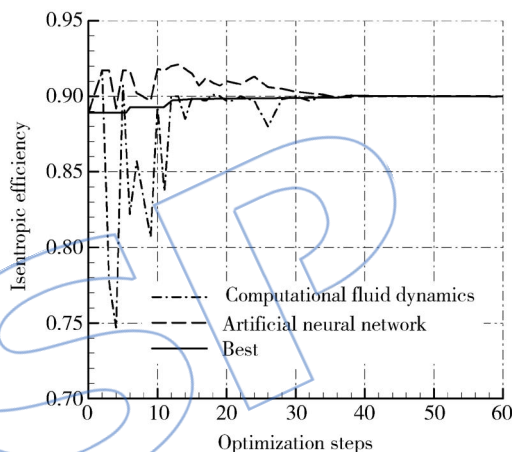


图5 优化收敛曲线

Fig. 5 Convergence histories

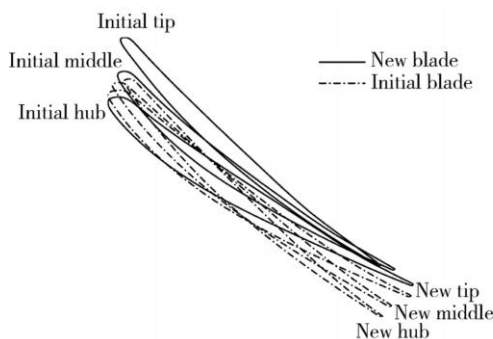


图6 转子2根、中、尖截面优化前后对比图

Fig. 6 Comparison of blade geometries at typical section

4 结果分析

为详细研究转子2优化前后对转压气机性能及细微流场结构的变化,本文对设计转速下转子2优化后对转压气机进行全工况数值模拟,并将计算结果与优化前进行对比分析.转子2优化前后对转压气机特性分布表明,在全工况范围内压比均提升2%左右,设计点压气机效率提高1.5%

左右,但随着流量的减小优化前后压气机效率基本相同.由于优化目标的设定并未对喘振裕度进行约束,转子 2 叶片优化后的不稳定工作点右移,致使流量稳定裕度有所下降.

大,叶片加功量提高.
为较清楚的对比优化前后流场结构,图 9 和图 10 分别给出了转子 2 优化前后对转压气机近设计点 50 %和 95 %叶展处 S_1 面马赫数分布图.

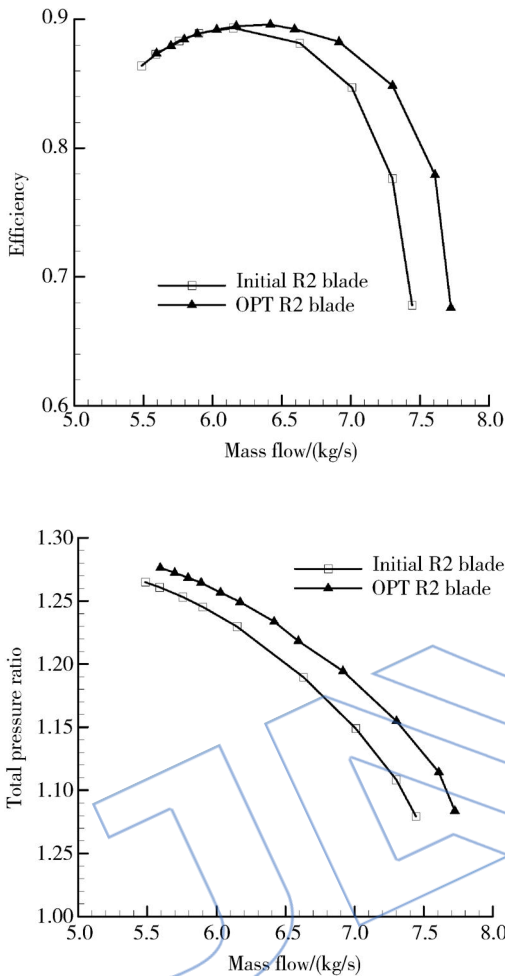


图 7 转子 2 优化前后对转压气机效率和压比特性
Fig. 7 Comparison of efficiency and pressure ratio curve before and after optimization

5 优化前后流场对比分析

图 8 给出了近设计点转子 2 优化前后叶片 5 %,50 %和 95 %三个典型截面近壁面马赫数分布情况,为保证两种条件下参数可比性,在参数选取过程中采用相同网格层马赫数进行对比分析.从 5 %叶展马赫数分布图可以看出,转子 2 优化后近壁面吸、压力面马赫数都有一定程度的增加,且吸、压力面马赫数包围面积增大,说明优化后转子 2 根部加功量有所提高.50 %,95 %两个截面马赫数分布情况表明叶片优化后最高马赫数都有一定程度的降低,且吸力面马赫数下降斜率减小,高马赫数区范围有一定增加,吸压力面包围面积增

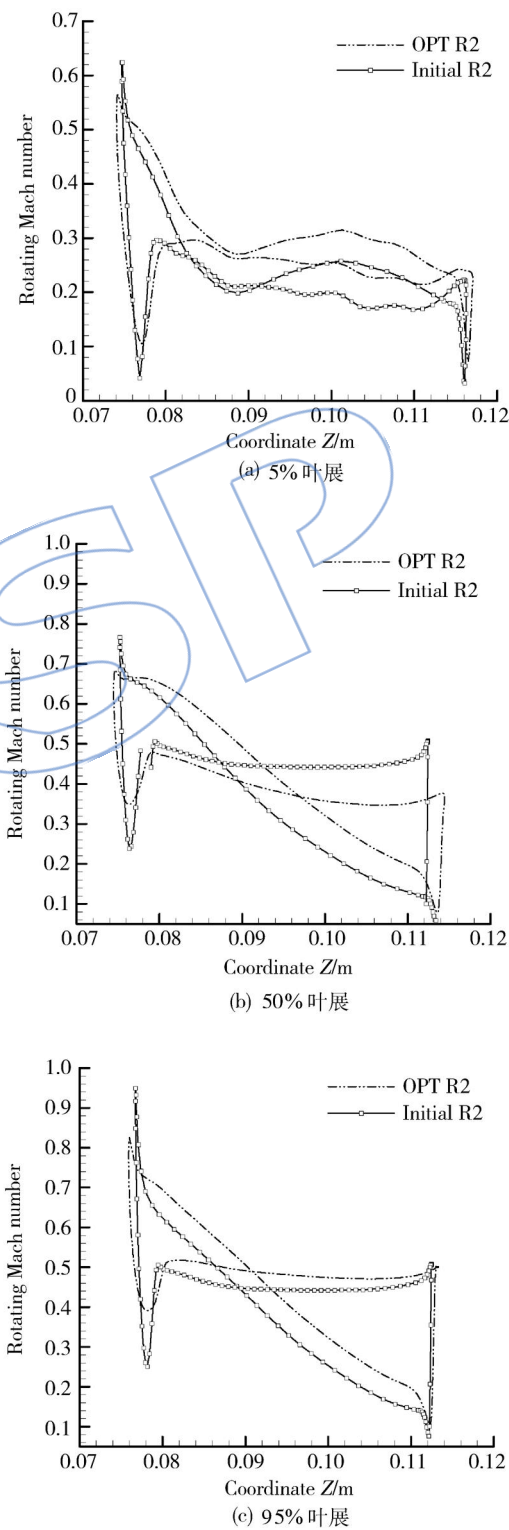


图 8 5 %,50 %和 95 %叶展相对马赫数对比
Fig. 8 Comparison of relative Mach number distributions at 5 %,50 %,95 % blade span

50 %叶展截面马赫数分布情况显示,优化后转子 2 叶片出口尾迹流动显著减弱,使得尾迹区内的马赫数大幅提升.尖部截面从优化前马赫数云图可知转子 2 前缘受间隙内流动影响,马赫数等值

线密集.优化后马赫数等值线分布得到一定改善,且转子 1 吸力面分离有所减弱,低速分离区的范围有所减小. 为评估非优化工况点时流场细节的变化,图 11

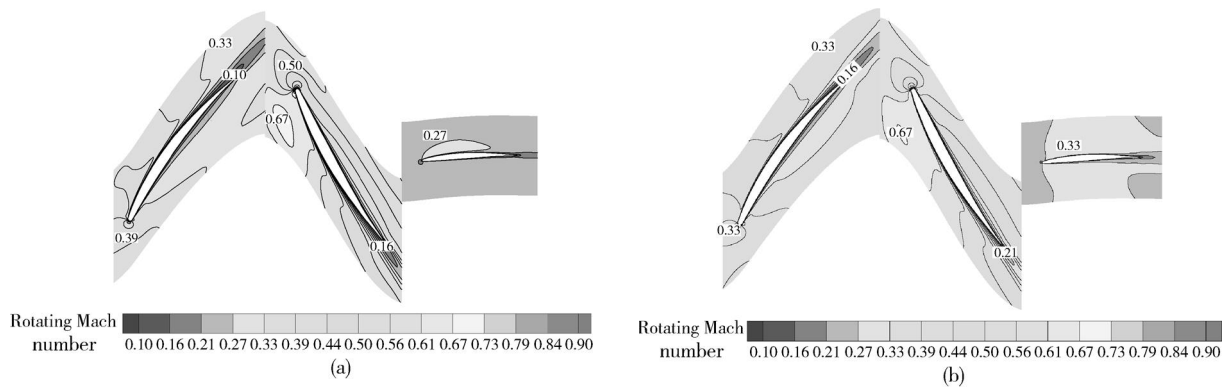


图 9 设计工况优化前后 50 %叶展马赫数分布
Fig. 9 Relative Mach number contours at 50 % span before and after optimization

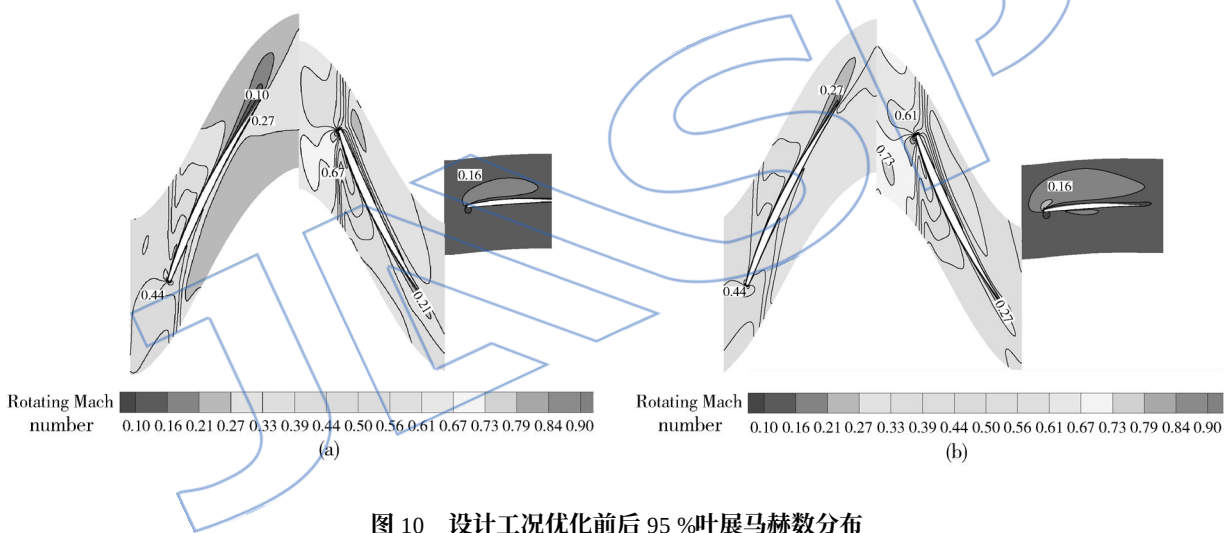


图 10 设计工况优化前后 95 %叶展马赫数分布
Fig. 10 Relative Mach number contours at 95 % span before and after optimization

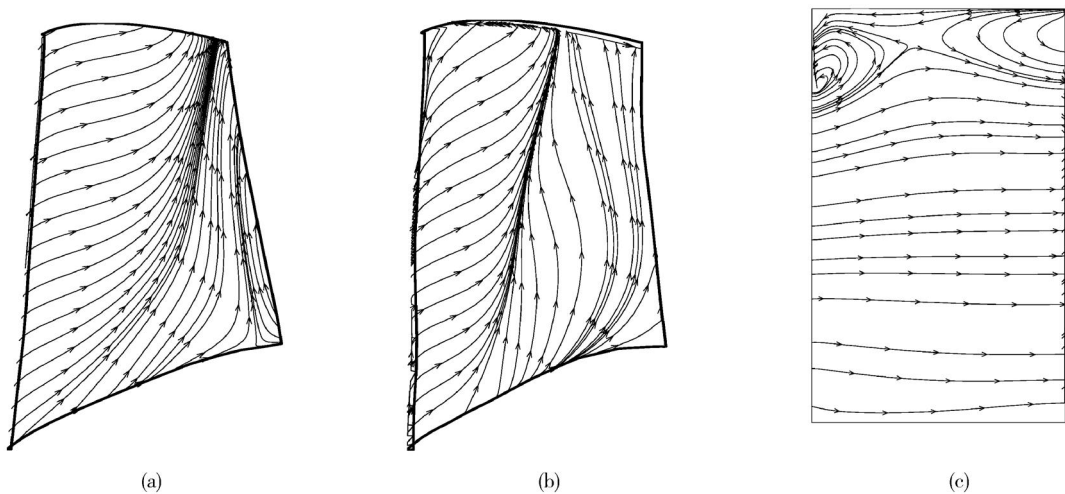


图 11 优化后近端点转子 1、转子 2 和出口导流叶片吸力面极限流线
Fig. 11 Suction streamlines of rotor 1 ,rotor 2 and OGV near stall condition after optimization

给出了优化后近端点各叶排吸力面极限流线分布图.对比图 5 分析,转子 1 吸力面优化前后流动情况基本一致,转子 2 吸力面前缘顶部的倒流在优化后得到改善,原因是优化后转子 2 进口来流速度的增大,增加了端壁区流体的动能,同时在整个叶展范围内分离线往尾缘移动.出口导流叶片顶部改善显著,前缘处角涡处成型的涡核得到了很好的抑制,由一个较大的回流区替代.在涡的后部,近端壁的气流仍有倒流现象,但由于其速度很小,受到主流冲击的影响又转回与主流相同的流向.优化后顶部流场受上端壁的影响仍十分明显.

图 12 给出了优化前后近端点 95 %叶展截面

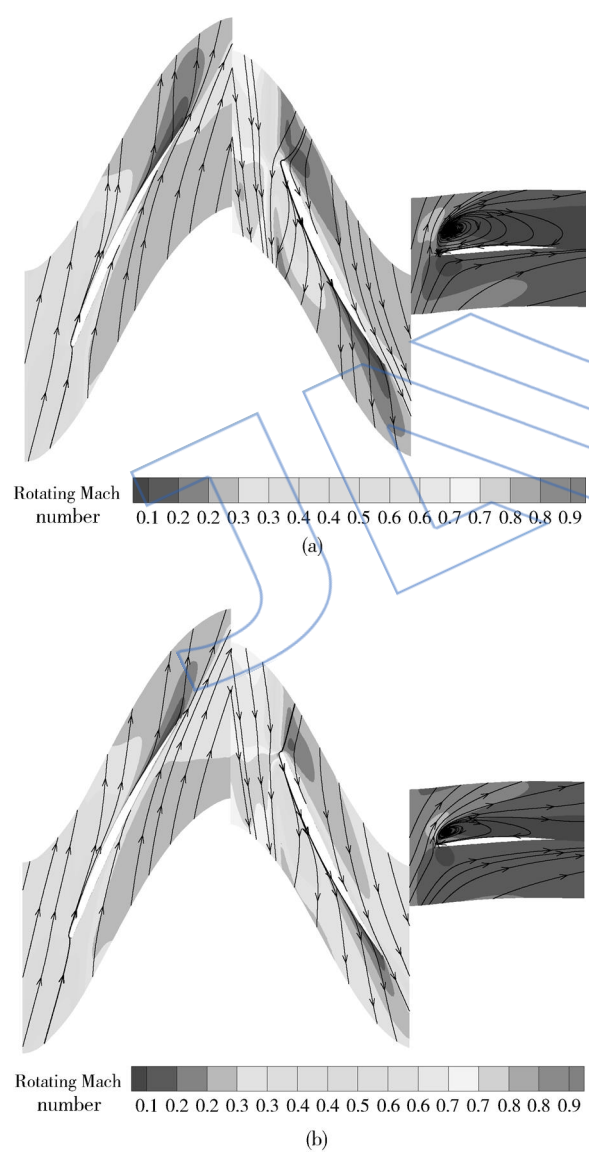


图 12 设计工况优化前后对转压气机 95 %叶展马赫数云图及流线分布对比

Fig. 12 Relative Mach number streamlines at 95 % span before and after optimization

相对马赫数云图及流线分布对比,进一步验证了出口导流叶片顶部流场的改善.对比优化前后转子 2 的流线图,优化前转子 2 几乎从前缘处开始吸力面上的气流就开始偏离主流方向,沿着周向流动,并且越靠近尾缘偏离的角度越大,因此在吸力面形成了一个很大的分离区.优化后转子 2 吸力面气流分离点后移,同时尾迹区内的低速区域速度有所提升.

6 结 论

本文以某轴流式双排对转压气机为研究对象,采用三维叶型优化方法对转子 2 进行基于多级环境下的叶型优化,以最大化等熵效率为目标函数,并对优化前后压气机流场进行数值模拟.优化结果显示:

转子 2 叶型的调整使得对转压气机整体性能显著提高,设计点附近等熵效率上升 1.5 %,在整个流量范围内压比约提升了 2 %.不足之处是优化前未对流量稳定裕度进行约束致使流量稳定裕度略有下降.

对转压气机转子 2 优化前后性能分析表明,多级环境下的三维优化设计能够达到满意的优化效果,并考虑到了对转环境下级间复杂的动干涉问题,是优化设计方法新的发展趋势.

存在的不足之处:优化前后未对非设计转速下的内部流场进行对比分析,由于对转压气机两级转子不同转速比时流动状态差异较大,设计转速下进行的叶片优化改型在非设计转速下的特性和流场细微结构需进一步深入研究.

参考文献:

[1] 王掩刚,刘波. 双极对转压气机流场分析研究[J]. 西北工业大学学报,2006,24(1):97-98.
WANG Yangang, LIU Bo. Investigation of two stage counter-rotating compressor [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(1): 97-98. (in Chinese)
[2] 蔡睿贤. 有关对转涡轮基本设计与应用的进一步思考[J]. 航空动力学报,2001,16(3):193-198.
CAI Ruixian. Consideration on the basic design and application of counter-rotating turbines [J]. 2001, 16 (3): 193-198. (in Chinese)
[3] Knapke R D. Time accurate simulations of a counter-rotating aspirated compressor [R]. ASME Turbo. Expo., GT 2008-50877, 2008.
[4] Kerrebrock J L. Design and test of an aspirated counter-rotating fan[J]. Journal of Turbomachinery APRIL, 2008, 130:198-206.

- [5] 金东海, 展昭. 基于混合遗传算法的压气机叶型自动优化设计[J]. 推进技术, 2006, 27(4): 349-353.
JIN Donghai, ZHAN Zhao. Automatic design optimization of compressor blades based on hybrid genetic algorithm [J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(4): 349-353. (in Chinese)
- [6] Aditi J. Optimization of turbomachinery airfoil shape for improved shape [R]. 39th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, AIAA-98-1917, 1998.
- [7] Madavan K. Aerodynamic shape optimization using hybridized differential evolution[R]. 21st AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA 2003-3792, 2003.
- [8] Oksuz O. Aerodynamic optimization of turbomachinery cascades using Euler/ boundary-layer coupled genetic algorithms [R]. 15th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, AIAA 2001-2577, 2001.
- [9] Anguita D. An innovative technique for the aerodynamic design of turbine blade profiles using artificial intelligence [R]. 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, AIAA 2003-3737, 2003.
- [10] 陈云永, 刘波. 全三维、多叶排内外涵风扇压气机叶型优化研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 517-521.
CHEN Yunyong, LIU Bo. Three-dimension blade optimization of multi-blade of a fan/compressor [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 517-521. (in Chinese)
- [11] Jang C M. Optimal design of swept, leaned and skewed blades in a transonic axial compressor [R]. ASME Turbo. Expo., GT 2006-90384, 2006.
- [12] LIAN Yongsheng. Multiobjective optimization using coupled response surface model and evolutionary algorithm [R]. AIAA Paper 2004-4323, 2004.
- [13] 曹志鹏, 靳军. 基于优化技术的叶型反方法改进设计[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 484-489.
CAO Zhipeng, JIN Jun. Turbomachinery profile design by an improved inverse method based on optimization technique [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4): 484-489. (in Chinese)