

双级对转压气机全工况优化设计

张 鹏, 刘 波, 曹志远, 史 磊

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为全面提升对转压气机气动性能,以某双级对转压气机为研究对象,基于人工神经网络与遗传算法,针对转子 2 叶片在整机环境下进行全工况优化设计,并对优化前后几何形状、总体性能及流场结构进行了对比分析。结果表明:优化后对转压气机全工况范围内等熵效率及压比均得到提升,同时流量范围有所增大。在设计点整机等熵效率提高 0.3%,近失速点整机等熵效率提高 1.5%,喘振裕度上升了 6.37%,稳定工作范围得到显著扩大。优化后转子 1 全工况范围内等熵效率和压比特性变化不大,而转子 2 全工况范围内等熵效率和压比均有较大提高,其中在设计点转子 2 等熵效率上升 1%,近失速点转子 2 等熵效率上升 2.5%;在近失速点,优化后转子 1、转子 2、出口导叶(OGV)尖部流场显著改善。

关 键 词: 对转; 压气机; 全工况; 优化设计; 等熵效率

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Optimization design of a two-stage counter-rotating compressor under overall working conditions

ZHANG Peng, LIU Bo, CAO Zhi-yuan, SHI Lei

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

Abstract: In order to improve aerodynamic performance of the counter-rotating compressor in an all-round way, overall working conditions optimization design was carried out on the Rotor 2 of a two-stage counter-rotating compressor in multistage environment based on artificial neural network and genetic algorithm. The changes of geometry, overall performance and flow field were compared and analyzed. Results show that: after the optimization, the overall isentropic efficiency and pressure ratio of the counter-rotating compressor are both improved, meanwhile the range of mass flow is widened. The isentropic efficiency of the counter-rotating compressor increases by 0.3% on the design point, increases by 1.5% near the stall point, and the surge margin increases by 6.37%. After the optimization, the overall isentropic efficiency and pressure ratio of the Rotor 1 are almost unchanged, but those of Rotor 2 are raised much. The isentropic efficiency of Rotor 2 improves by 1% on the design point, and the isentropic efficiency is improved by 2.5% near the stall point. Also, the flow fields of Rotor 1, Rotor 2 and outlet guide vane (OGV) at the tip are improved remarkably near the stall point.

Key words: counter-rotating; compressor; overall working conditions; optimization design; isentropic efficiency

随着航空发动机的不断发展,对转技术作为一种提高航空发动机性能的有效技术应运而

生^[1-2]。对转压气机是继对转涡轮之后的又一种新型叶轮机械,由于其在结构设计和气动性能方面

收稿日期:2013-06-28

基金项目:国家自然科学基金(51236006)

作者简介:张鹏(1988—),男,湖北黄冈人,博士生,主要从事压气机气动优化设计。

与常规压气机相比有着明显的优势,因而越来越受到叶轮机研究人员的重视^[3-9]。

叶型优化技术是提高压气机性能的有效途径,传统的优化方法是对若干个基元级叶型分别进行优化后积叠生成三维叶片^[10-13],然而其很难保证基元级叶型最优对应整机压气机性能最优。近年来基于人工神经网络和遗传算法相结合的寻优方法在全三维叶片优化设计过程中广泛应用^[14-18],但是大部分研究重点都是结合研究对象进行单工况点优化,优化结果虽然提高了优化工况点处压气机的性能,却无法保证压气机的变工况性能。基于以上背景,本文针对某双级对转压气机转子 2 在设计转速下进行全工况全三维叶片优化设计,旨在全工况范围内提高该对转压气机性能,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

本文以西北工业大学叶栅国防重点实验室的轴流式双级对转压气机(简称对转压气机)试验台为研究对象,其实物图如图 1 所示。试验台主要包括进口导叶(IGV)、转子 1(Rotor 1)、转子 2(Rotor 2)和出口导叶(OGV),其设计参数为:Rotor 1 和 Rotor 2 转速均为 8000 r/min(从进口向下游看,Rotor 1 为顺时针旋转,Rotor 2 为逆时针旋转),流量为 6.4 kg/s,总压比为 1.22,绝热效率为 0.89。

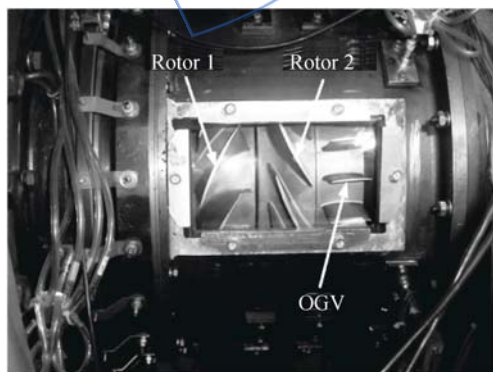


图 1 对转压气机实物图

Fig. 1 Photo of counter-rotating compressor

2 数值模拟方法

数值模拟由商业软件 NUMECA 完成。采用 NUMECA 软件包中的 AUTOGRID 模块自动生成 O4H 网格拓扑结构,叶片表面计算网格如图 2

所示。为了消除网格密度对数值模拟的影响,使数值计算更加可靠,本文设计了 G1、G2 和 G3 三套网格,网格总数分别约为 91 万、132 万和 194 万。计算过程采用 FINE/TURBO 软件包,应用 Jameson 有限体积差分格式并结合 Spalart-Allmaras 湍流模型对相对坐标系下的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解,空间离散采用 2 阶精度的中心差分格式,时间项采用 4 阶 Runge-Kutta 方法迭代求解, Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 数取 3.0。根据实验条件,边界条件给定进口绝对总温、绝对总压和进口气流角,出口给定静压。考虑全工况优化计算量较大,文中整个优化过程在课题组的 IBM BladeCenter HS21 刀片服务器上采用 OMPI(open message passing interface)协议进行并行计算,并行 CPU 数目为 12 个。

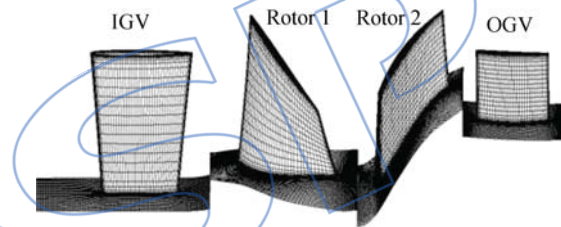


图 2 对转压气机计算网格

Fig. 2 Computing grids for counter-rotating compressor

设计转速下,对转压气机不同网格密度数值模拟结果与实验结果对比如图 3 和图 4 所示。从压比/流量特性分布可以看出计算值和实验值吻合较好。对于等熵效率/流量特性,计算值和实验值存在一定的误差,分析原因是实验过程采用总压比和温度进行等熵效率计算,压比通过压力探

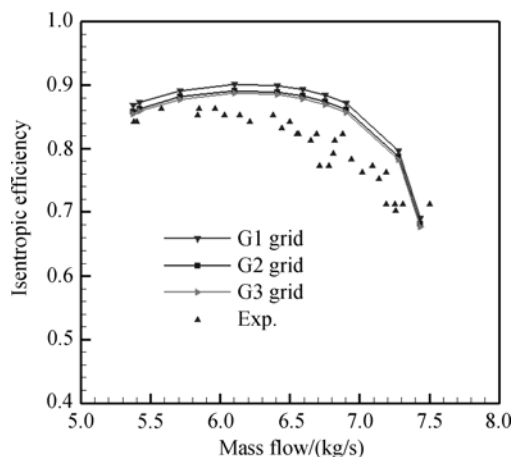


图 3 对转压气机等熵效率特性

Fig. 3 Isentropic efficiency performance of counter-rotating compressor

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,但受变频电动机干扰,温度测量的精度受到一定影响变化幅度较大.对比 3 套网格计算结果可以看出,无论对于压比/流量特性还是等熵效率/流量特性,G2 网格和 G3 网格计算结果变化不大,因此本文数值模拟采用 G2 网格.

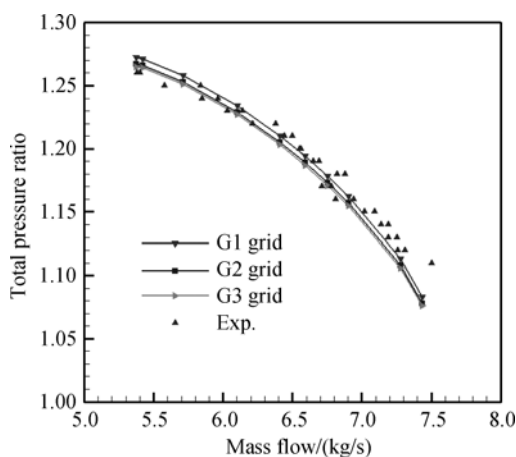


图 4 对转压气机总压比特性

Fig. 4 Total pressure ratio performance of counter-rotating compressor

图 5 给出了对转压气机设计转速下整机环境下两排转子的等熵效率特性,由图可以看出:转子 1 等熵效率曲线较为平稳,转子 2 等熵效率曲线随流量变化较大;各工况点,转子 2 等熵效率均明显低于转子 1 等熵效率,尤其在近堵塞点两者差别更大.由此可知,转子 2 的性能提升空间较大,为最大程度上提高该对转压气机性能,为此选择转子 2 作为优化对象.

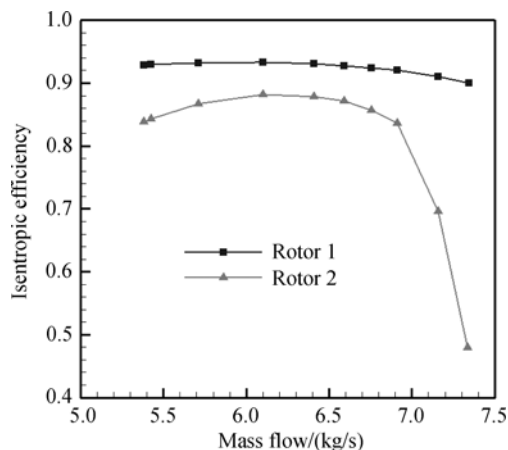


图 5 设计转速下两排转子等熵效率特性

Fig. 5 Isentropic efficiency performance of rotors at design speed

3 三维优化方法

三维优化工具采用 Fine/Design 3D 软件包,优化过程是基于人工神经网络和遗传算法展开的.优化前采用 Fine/Design 3D 中的 Database Generation 模块生成数据库,数据库样本保持轮毂机匣线不变,通过将 4 个不同叶展(5%叶展、38%叶展、63%叶展、95%叶展)处截面的叶型进行径向积叠生成三维叶片,对影响叶片积叠线形式(弯掠分别采用 4 个控制点)和叶型中弧线(63%叶展和 95%叶展处分别采用 5 个控制点)的 18 个优化变量按离散层取样方式分 4 个区域在约束范围内微扰生成 200 个样本.优化过程应用 Fine/Design 3D 中的 Optimization 模块,利用人工神经网络来拟合目标函数和优化变量之间的关系,通过遗传算法预测目标函数的最优值.在优化目标函数选取方面,为了全面衡量对转压气机的全工况性能,避免单工况点优化带来的喘振裕度下降,本文的优化目标函数涵盖了特性线上 3 个典型工况点(近失速点、设计点、近堵塞点)的信息,包括了这 3 个工况点的气动性能:流量、等熵效率和压比.具体目标函数定义如下:

$$\begin{aligned} \min F = & W_1 \cdot \Delta M_{\text{nearstall}}^2 + W_2 \cdot \Delta M_{\text{design}}^2 + \\ & W_3 \cdot \Delta M_{\text{nearchoke}}^2 - (W_4 \cdot \Delta \eta_{\text{nearstall}} + \\ & W_5 \cdot \Delta \eta_{\text{design}} + W_6 \cdot \Delta \eta_{\text{nearchoke}}) - \\ & (W_7 \cdot \Delta \pi_{\text{nearstall}} + W_8 \cdot \Delta \pi_{\text{design}} + \\ & W_9 \cdot \Delta \pi_{\text{nearchoke}}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $W_1 \sim W_9$ 为各子目标函数的权重系数; ΔM 为各工况点流量的相对变化量; $\Delta \eta$ 为各工况点等熵效率的相对变化量; $\Delta \pi$ 为各工况点压比的相对变化量.在本次优化中,将 W_4 和 W_5 设置为 4;将 W_1, W_2, W_6, W_7 和 W_8 设置为 2;将 W_3 和 W_9 设置为 1,即在优化过程中侧重考虑近失速点和设计点工况,且相比压比、流量更注重等熵效率.

经过大约 40 步的迭代,目标函数基本收敛,图 6 给出了其中设计点等熵效率优化收敛过程(图中 ANN 为人工神经网络预测值,CFD 为三维流场验证值,Best 为当前计算最佳值).优化前后叶根、叶中、叶尖截面叶型对比如图 7 所示,由图可知,优化后转子 2 略有后掠,且整个叶片向压力面一侧略弯,由于优化过程中没有改变叶型的厚度分布,因此优化后转子 2 各截面叶型仅仅中弧线沿流向曲率有所变化.

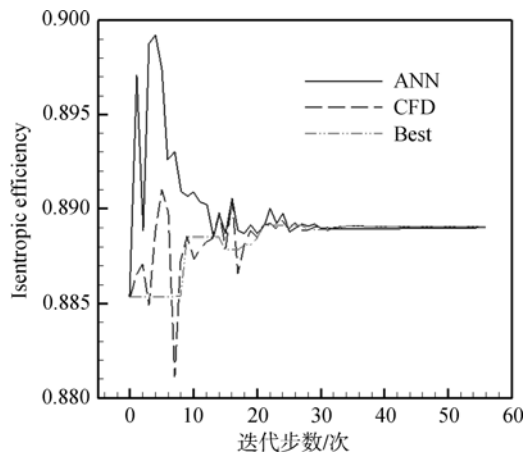


图6 优化收敛曲线

Fig. 6 Optimization convergence curves

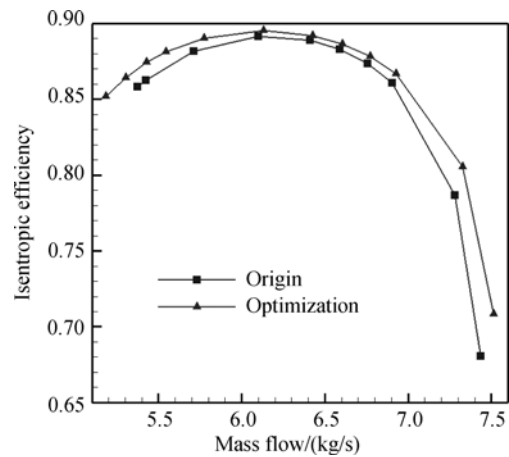


图8 优化前后对转压气机等熵效率特性对比

Fig. 8 Comparison of isentropic efficiency performance of counter-rotating compressor before and after optimization

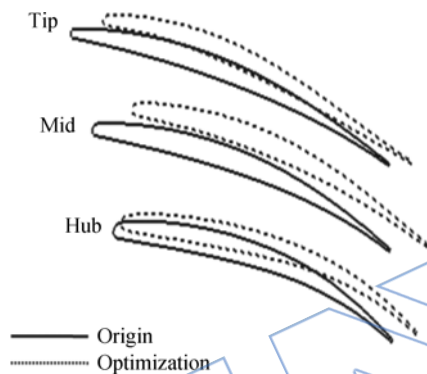


图7 转子2典型截面叶型优化前后对比图

Fig. 7 Comparison of blade geometries at typical sections of Rotor 2 before and after optimization

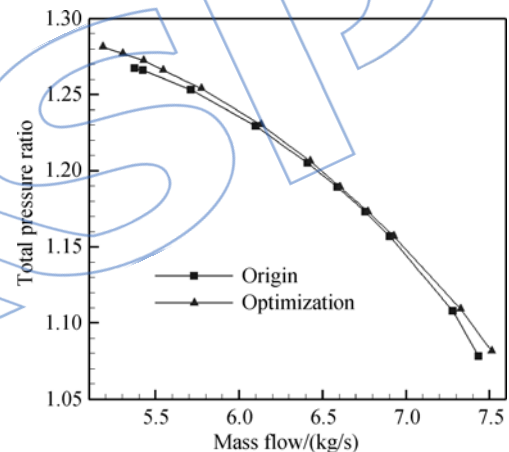


图9 优化前后对转压气机总压比特性对比

Fig. 9 Comparison of total pressure ratio performance of counter-rotating compressor before and after optimization

4 优化结果分析

4.1 全工况性能分析

图8和图9分别给出了优化前后对转压气机等熵效率特性和总压比特性对比。由图8和图9可知,优化后对转压气机最大流量增大,同时喘振点流量减小,即流量裕度增大;在整个流量范围内对转压气机的等熵效率和压比均不同程度的增大,在近设计点等熵效率约提高0.3%,近失速点等熵效率约提高1.5%,而近堵塞点等熵效率提高的幅度更大。优化前对转压气机喘振裕度为25.39%,优化后上升为31.76%,提高了6.37%,其中喘振裕度计算公式如下:

$$S_m = \left[\frac{\pi_{as}^* / \dot{m}_{as}}{\pi_{ao}^* / \dot{m}_{ao}} - 1 \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中 S_m 为压气机喘振裕度系数; $\dot{m}_{as}$, π_{as}^* 分别为喘振边界点处的流量和压比; $\dot{m}_{ao}$, π_{ao}^* 分别为设计点处的流量和压比。

图10和图11分别给出了优化前后转子1等熵效率特性和压比特性对比。由图10和图11可知,转子2优化前后,转子1性能几乎不变,等熵效率特性和压比特性分布曲线几乎重合,只是在近失速点和近堵塞点附近等熵效率和压比略有提高。

图12和图13分别给出了优化前后转子2等熵效率特性和压比特性对比。由图12和图13可知,优化后转子2全工况性能有明显提升,全工况等熵效率和压比均有不同程度提高。在近失速点转子2等熵效率上升约2.5%,设计点转子2等熵效率上升约1%。同时对比对转压气机整机等熵效率特性和压比特性可以看出,全工况范围内对转压气机整机性能的提升很大程度上得益于转

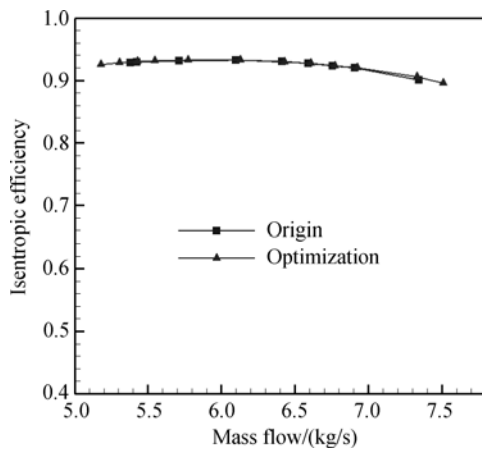


图 10 优化前后转子 1 等熵效率特性

Fig. 10 Comparison of isentropic efficiency performance of Rotor 1 before and after optimization

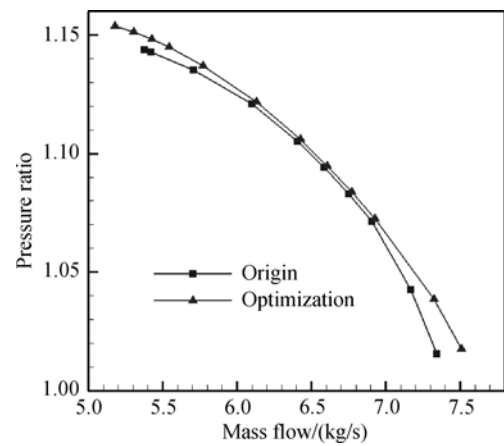


图 13 优化前后转子 2 压比特性对比

Fig. 13 Comparison of pressure ratio performance of Rotor 2 before and after optimization

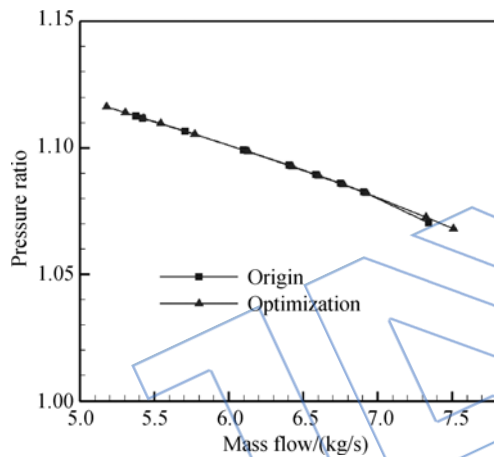


图 11 优化前后转子 1 压比特性对比

Fig. 11 Comparison of pressure ratio performance of Rotor 1 before and after optimization

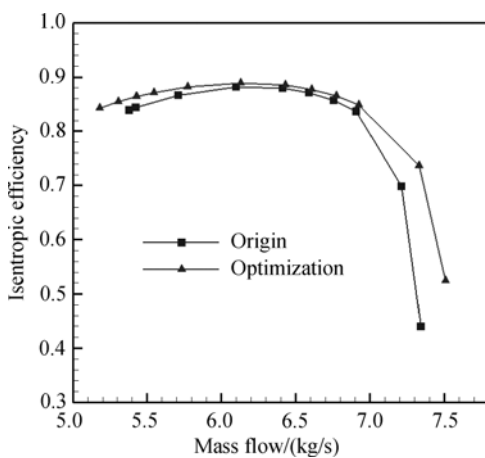
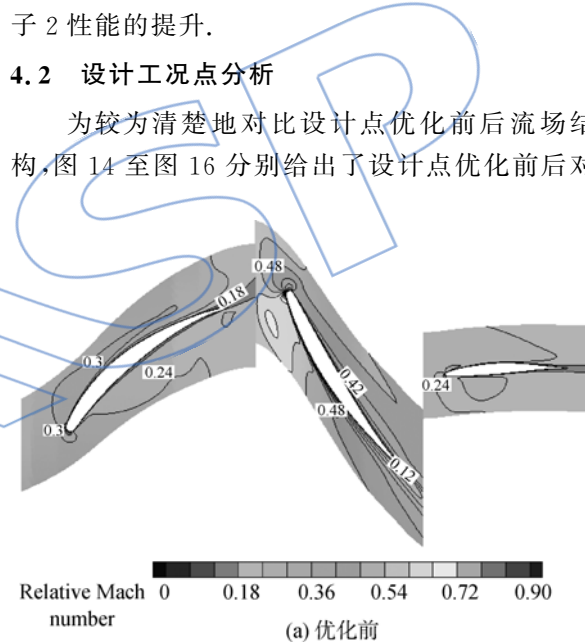
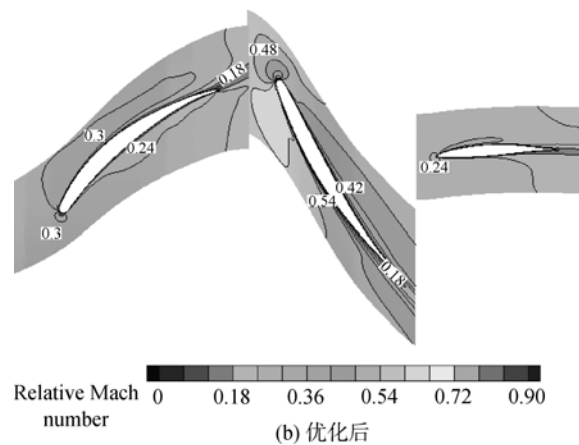


图 12 优化前后转子 2 效率特性对比

Fig. 12 Comparison of isentropic efficiency performance of Rotor 2 before and after optimization



(a) 优化前



(b) 优化后

图 14 设计工况优化前后根部截面相对马赫数云图

Fig. 14 Relative Mach number contours at the hub section before and after optimization on design point

子 2 性能的提升.

4.2 设计工况点分析

为较为清楚地对比设计点优化前后流场结构,图 14 至图 16 分别给出了设计点优化前后对

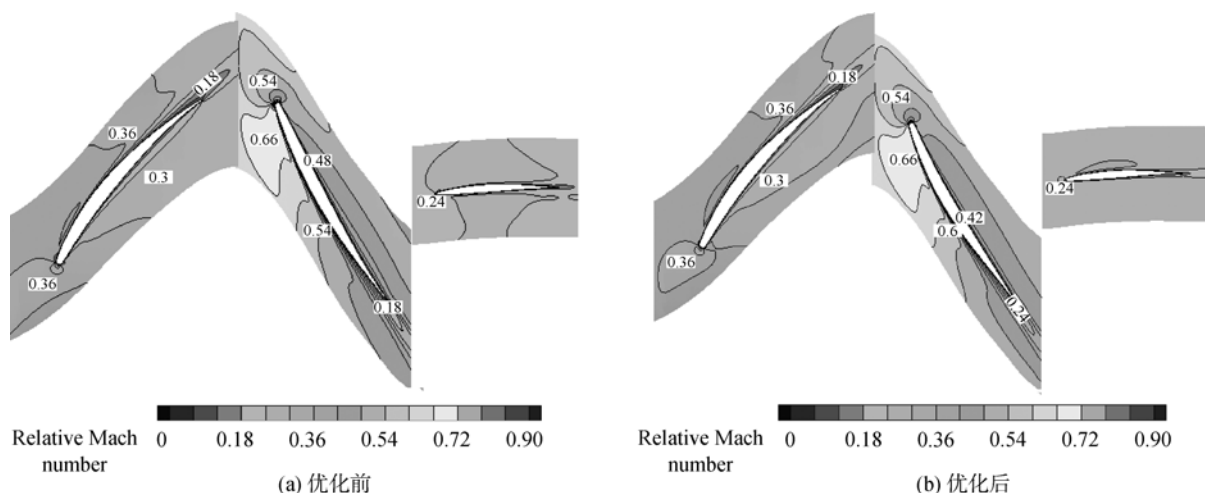


图 15 设计工况优化前后中部截面相对马赫数云图

Fig. 15 Relative Mach number contours at the mid section before and after optimization on design point

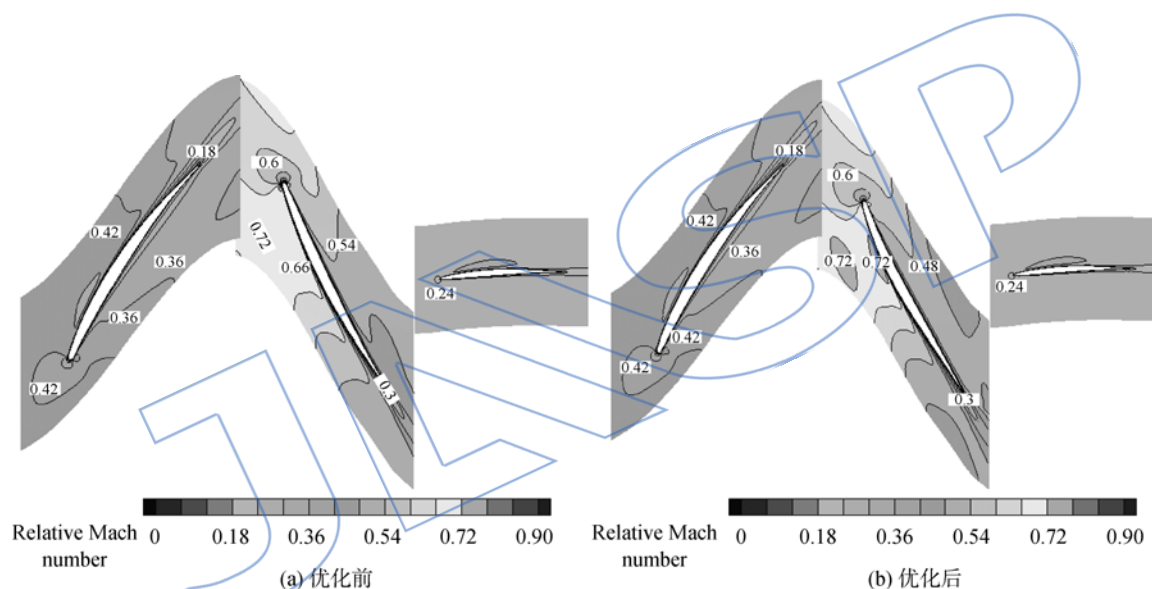


图 16 设计工况优化前后尖部截面相对马赫数云图

Fig. 16 Relative Mach number contours at the tip section before and after optimization on design point

转压气机转子 2 叶根、叶中、叶尖处的截面相对马赫数云图。叶根和叶中截面相对马赫数分布情况表明,优化后转子 2 叶片出口尾迹流动明显减弱,尾迹区内的相对马赫数大幅提升。叶尖截面相对马赫数分布情况显示,由于优化前转子 2 流动状态较好,尾迹流动较弱,且来流流速为亚声速,优化后转子 2 叶片出口尾迹流动状态几乎不变。而对于转子 1 和出口导叶,相对马赫数分布变化不大。转子 2 根部和中部分流动状态的改善也使得设计点转子 2 等熵效率提高了约 1%。

4.3 近失速工况点分析

由全工况性能比较可知,优化后近失速工况下,对转压气机性能提升显著,为进一步分析该工况优化后性能提高的原因,图 17 和图 18 分别给

出了近失速工况优化前后转子 1、转子 2 和出口导叶吸力面极限流线图。由图 17 可知,优化前,转子 1 在靠近尾缘区域出现分离,分离线贯穿整个叶片高度;转子 2 流动状态更为恶劣,整个叶高方向分离区域更大,分离线大约距叶尖尾缘 25% 轴向弦长处;出口导叶在叶片顶部约 30% 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,呈现出强烈的非定常特性。由图 18 可知,优化后转子 1 虽然叶片尾缘处分离没有完全消除,但分离线高度降至约 90% 叶高,分析原因是由于转子 2 优化后,转子 2 及其下游的出口导叶在靠近尖部区域流动状态得到改善,气流通流能力增强,从而使转子 1 靠近尖部区域流动亦有所好转;对于转子 2,优化后分离线后移至叶片叶尖尾缘附

近,整个叶片高度流动均有所改善;优化后出口导叶叶片顶部改善显著,分离区范围减小至 15% 叶展.

图 19 给出了近失速点优化前后 95% 叶展截面流线/相对马赫数云图对比,进一步验证了转子

2 优化后转子 1、转子 2 和出口导叶尖部流场的改善.对比优化前后流线分布可以看出,优化前转子 2 和出口导叶均明显处于大攻角状态,转子 2 在吸力面尾缘处气流出现较大分离,而对于出口导叶气流从前缘开始分离,叶片吸力面存在大片旋

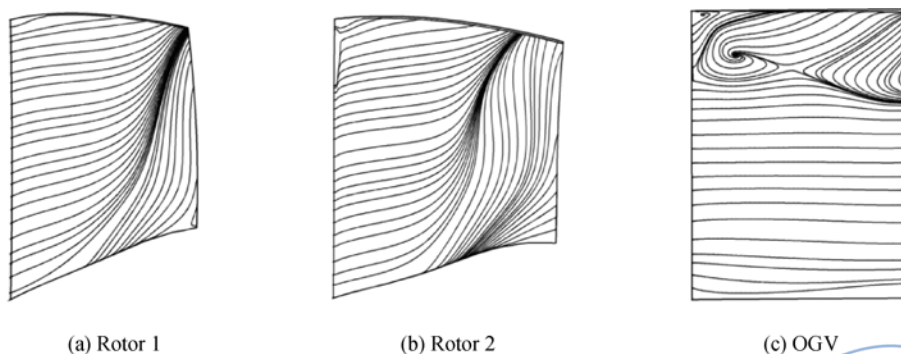


图 17 近失速工况优化前转子 1、转子 2 和出口导叶吸力面极限流线图

Fig. 17 Suction surface limited streamlines of Rotor 1, Rotor 2, OGV before optimization at near stall point

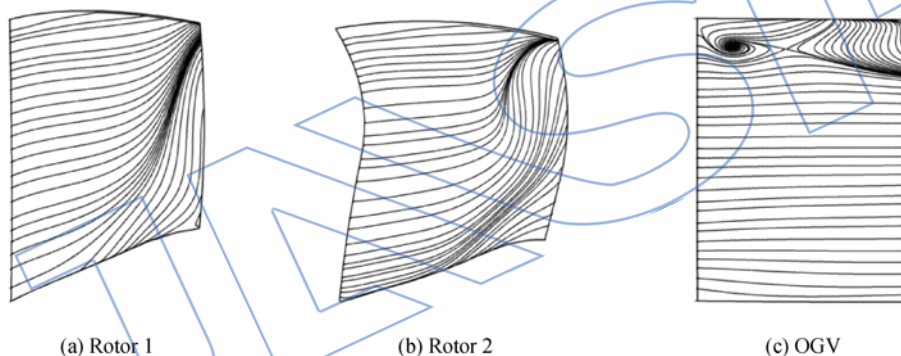


图 18 近失速工况优化后转子 1、转子 2 和出口导叶吸力面极限流线图

Fig. 18 Suction surface limited streamlines of Rotor 1, Rotor 2, OGV after optimization at near stall point

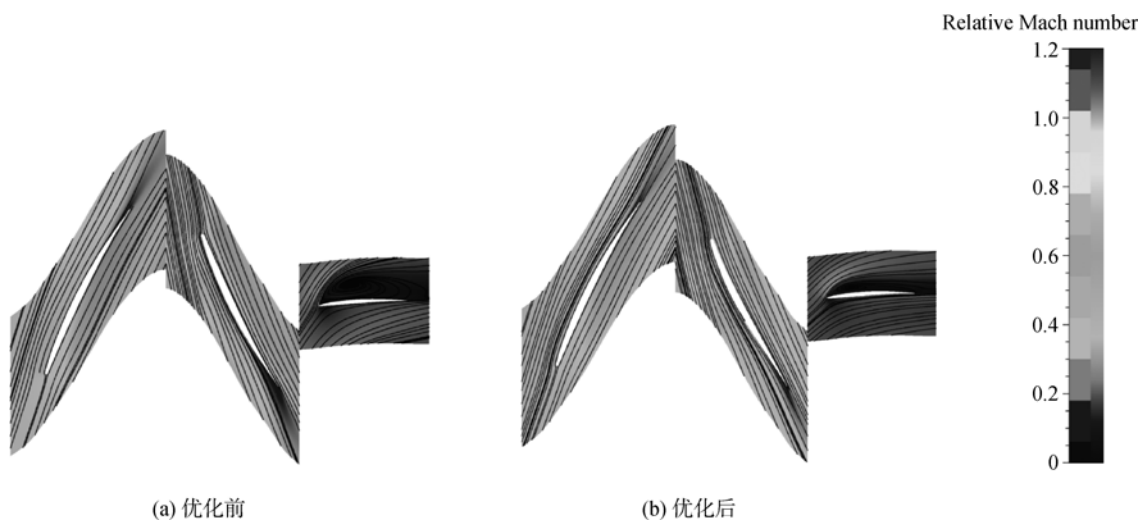


图 19 近失速工况优化前后对转压气机 95% 叶展截面流线/相对马赫数云图

Fig. 19 Streamlines/relative Mach number contours on 95% span section before and after optimization at near stall point

涡区域,分布于叶片吸力面前缘到尾缘整个吸力面.优化后,转子2中弧线曲率沿流向方向合理调整,出口几何角有所增大,一方面使得转子2位于尾缘处的气流分离得到一定程度上的抑制,增强了气流通流能力;另一方面转子2出口几何角的增大,有效地减小了出口导叶的进口气流角,进而使得出口导叶进口大攻角状态得到一定缓解,吸力面分离区域明显减小.

5 结 论

本文以某双级对转压气机为研究对象,基于全三维数值模拟优化平台成功地对其转子2叶片在整机环境下进行了全工况优化,并对比研究了优化前后对转压气机的性能和流场结构,结论如下:

1) 本文成功地对转子2叶片在整机环境下进行了全工况优化,有效地提高了对转压气机全工况性能,优化后在近设计点整机等熵效率提高约0.3%,近失速点整机等熵效率提高约1.5%,喘振裕度提高了6.37%.

2) 转子2优化后,转子1的性能变化不大,等熵效率和压比特性曲线几乎重合,而转子2全工况性能均有不同程度的提升,在设计点转子2等熵效率上升约1%,近失速点转子2等熵效率上升约2.5%.因此对于该双级对转压气机而言,转子2性能的提升使得整机性能得到极大提升.

3) 在设计工况点,优化后转子2尖部截面流场变化不大,根部和中部截面流场低速区域有所减少,分离现象有所减弱.转子2根部和中部截面流动状态的改善使得设计点转子2等熵效率提高了约1%.

4) 在近失速工况点,优化后转子2尖部截面由于中弧线曲率沿流向方向合理调整,出口几何角有所增大,使得转子2尖部截面靠近尾缘区域气流分离得到一定程度的抑制,同时还使出口导叶尖部截面进口大攻角状态得到一定缓解,吸力面分离区域明显减小,转子2和出口导叶尖部截面分离的减小,使得转子1尖部截面流通能力增强,进而使得转子1尖部截面分离推后,最终该工况点整机等熵效率提高了1.5%.

参考文献:

- [1] 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 appli-

cation of counter-rotating turbines[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(3): 193-198. (in Chinese)

- [2] 程荣辉.轴流压气机设计技术的发展[J].燃气涡轮试验与研究,2004,17(2):1-8.
CHENG Ronghui. Development of design technology for axial compressor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2): 1-8. (in Chinese)
- [3] 刘波,陈云永,项效镭,等.对转压气机数值模拟及实验研究[J].推进技术,2008,29(4):454-457.
LIU Bo, CHEN Yunyong, XIANG Xiaorong, et al. Experimental and numerical investigation of dual stage counter-rotating compressor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(4): 454-457. (in Chinese)
- [4] 刘波,侯为民,陈云永,等.对转压气机转差特性试验与数值模拟[J].航空动力学报,2009,24(2):403-408.
LIU Bo, HOU Weimin, CHEN Yunyong, et al. Experiment and numerical simulation of rotating-speed difference effects on a dual-stage counter-rotating compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 403-408. (in Chinese)
- [5] 陈云永.对转压气机特性流场分析及三维优化研究[D].西安:西北工业大学,2008.
CHEN Yunyong. Flow field and performance investigation and three-dimension optimization study of contra-rotating compressor[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2008. (in Chinese)
- [6] Shin H W, Whitfield C E, Wisler D C. Rotor-rotor interaction for counter-rotating fans: Part 1 three-dimensional flowfield measurements[J]. AIAA Journal, 1994, 32(11): 2222-2233.
- [7] Kerrebrock J L, Epstein A H, Merchant A A, et al. Design and test of an aspirated counter-rotating fan[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(2): 021004. 1-021004. 8.
- [8] Knapke R D, Turnet M G, List M G, et al. Time accurate simulations of a counter-rotating aspirated compressor[R]. ASME Paper GT-2008-50877, 2008.
- [9] Cho L, Choi H, Lee S, et al. Numerical and experimental analyses for the aerodynamic design of high performance counter-rotating axial flow fans[R]. ASME Paper FEDSM 2009-78507, 2009.
- [10] 金东海,展昭,桂幸民.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, GUI Xingmin. Automatic design optimization of compressor blades based on hybrid genetic algorithm[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(4): 349-353. (in Chinese)
- [11] Oksuz O. Aerodynamic shape optimization of turbomachinery cascades using Euler/boundary-layer coupled genetic algorithms[R]. AIAA 2001-2577, 2001.
- [12] Aditi J. Optimization of turbomachinery airfoil shape for improved shape[R]. AIAA 98-1997, 1998.
- [13] LI Lun, Morinishi K, Satofuka N, et al. Genetic algorithms development for multiobjective design optimization of

- compressor cascade[J]. Journal of Thermal Science, 1999, 8(3): 158-165.
- [14] 陈云永, 刘波, 马聪慧, 等. 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, MA Conghui, et al. Three-dimension blade optimization of multi-blade fan/compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 517-521. (in Chinese)
- [15] 王雷, 刘波, 梁俊, 等. 基于多级环境下的双排对转压气机优化设计[J]. 航空动力学报, 2010, 25(6): 1381-1388.
WANG Lei, LIU Bo, LIANG Jun, et al. Optimization of dual stage counter-rotating compressor in multistage environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1381-1388. (in Chinese)
- [16] 黄磊, 楚武利, 邓文剑. 压气机叶片扭曲规律的多目标三维气动优化[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 73-76.
HUANG Lei, CHU Wuli, DENG Wenjian. Multi-objective 3D aerodynamic optimization of twisted stacking of compressor blades[J]. Computer Simulation, 2009, 26(9): 73-76. (in Chinese)
- [17] 王雷, 刘波, 项效谔, 等. 双级对转压气机叶型优化研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(7): 886-890.
WANG Lei, LIU Bo, XIANG Xiaorong, et al. Blade optimization of a two-stage counter-rotating compressor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(7): 886-890. (in Chinese)
- [18] 王掩刚, 牛楠, 任思源, 等. 双级对转压气机多叶排全三维转子优化分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(11): 1310-1314.
WANG Yangang, NIU Nan, REN Siyuan, et al. Three-dimension rotor optimization in multi-blade row of a dual stage counter-rotating compressor[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(11): 1310-1314. (in Chinese)