

单级离心压气机气动性能预测与优化设计

王忠义¹, 李佳鹏¹, 王艳华¹, 周少伟²

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

摘要: 为了提升低转速工况下压气机的气动性能, 采用人工神经网络与遗传算法相结合的优化方法对某单级离心压气机离心叶轮的弯特性进行优化计算。利用 NUMECA 软件对该离心压气机进行了不同转速的数值模拟, 得到压气机不同工况下的气动性能。通过设置不同控制参数和曲线形式对离心叶轮叶片进行参数化拟合, 以 8 个改变叶片弯特性的参数为自由参数进行了叶型优化设计, 最终得到了优化后的叶轮叶片。结果表明: 优化后在低转速的设计工况下离心压气机压比增加了 4.69%, 稳定裕度拓宽了 17.41%。

关键词: 离心压气机; 气动性能; 叶型优化设计; 弯特性

中图分类号: TK474.8

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.10.016

[引用本文格式] 王忠义, 李佳鹏, 王艳华, 等. 单级离心压气机气动性能预测与优化设计[J]. 热能动力工程, 2021, 36(10): 119-125. WANG Zhong-yi, LI Jia-peng, WANG Yan-hua, et al. Aerodynamic performance prediction and optimization design of single stage centrifugal compressor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10): 119-125.

Aerodynamic Performance Prediction and Optimization Design of Single Stage Centrifugal Compressor

WANG Zhong-yi¹, LI Jia-peng¹, WANG Yan-hua¹, ZHOU Shao-wei²

(1. School of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001;

2. China Ship Development and Design Center, Wuhan, China, Post Code: 430064)

Abstract: In order to improve the aerodynamic performance of the compressor at low speed, an optimization method based on artificial neural network and genetic algorithm is used to optimize and calculate the bending characteristics of a certain single-stage centrifugal impeller. NUMECA software is used to numerically simulate the centrifugal compressor at different speeds, and the aerodynamic performance of the compressor under different working conditions is obtained. The centrifugal impeller blades are parameterized and fitted by setting different control parameters and curve forms. The blade profile optimization design is carried out with 8 parameters that change the bending characteristics of the blades as free parameters, and the optimized impeller blades are obtained. The results show that after the optimization, the pressure ratio of the centrifugal compressor is increased by 4.69%, and the stability margin is widened by 17.41% under the design conditions of low speed.

Key words: centrifugal compressor, aerodynamic performance, blade profile optimization design, bending characteristics

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-05-08

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-I-0007-0008)。

Fund-supported Project: Natural Science and Technology Major Project (2017-I-0007-0008)

作者简介: 王忠义 (1982-), 男, 吉林榆树人, 哈尔滨工程大学教授。

通讯作者: 王艳华 (1987-), 男, 河北衡水人, 哈尔滨工程大学讲师。

引 言

离心压气机具有稳定工作范围广、单级增压比高和抗腐蚀能力强等优点^[1]。单级离心压气机即可达到多级轴流压气机的增压效果。设计高压比、高效率 and 结构紧凑的离心压气机是该领域热点问题之一^[2],在设计过程中开展离心压气机气动性能预测与结构优化设计也具有重大意义。

Bonaiuti D 等人^[3]和 Cho S Y 等人^[4]采用 Bezier 曲线控制某压气机叶型,完成离心压气机的优化设计,结果表明,在优化后压比不变,绝热效率增加了 1.4%。Guo S 等人^[5]采用 Matlab 程序,通过进化算法解决多目标优化问题,以压比、等熵效率和工作投入要求为目标进行优化,结果显示,优化后的压气机压比提高了 7.5%,效率提高了 4.56%。张效溥等人^[6]采用 Kriging 模型和微种群遗传算法,以叶片重心积叠线周向构型为设计参数,对某宽弦风扇叶片进行优化设计,优化效果显著。Sang-Bum Ma 等人^[7]采用粒子群优化算法获得全局最优解对离心压气机的环腔进行优化,结果显示,压气机失速裕度提高了 1.87%。S. Shaaban^[8]和董素荣等人^[9]运用遗传算法和人工神经网络相结合的方法,并选取离心压气机的叶轮主叶片前缘掠角及分流叶片的吸力面与主叶片的夹角作为优化参数完成对压气机的优化,结果显示,优化后压气机的性能显著提高。Seo 等人^[10]通过对风扇叶片进行弯掠特性优化,使风扇效率显著提高,并指出弯掠叶片削弱叶顶间隙泄露流强度是效率提高的主要原因。Paresh Halder^[11]比较了原叶片与后掠叶片的气动性能,结果表明,后掠叶片能够有效拓宽失速裕度,但同时压气机峰值效率也被减小。

大量研究表明,压气机叶型设计对压气机整体气动性能起关键作用,对现有压气机叶片进行改型设计是有效提升压气机气动性能的方法。在众多针对压气机叶片的改型方案中,更改叶片在周向及轴向的积叠方式,即改变叶片的弯掠特性能够使其几何外型在三维结构上进行优化。以上大部分研究人员对离心压气机的优化并没有在叶轮弯特性方面进行深入研究。

本文将已有的高速离心压气机改型为低速压气

机,使其在低转速工况下具有较高的气动性能并对其进行全工况下进行气动性能分析。针对叶轮叶片弯特性建立参数化叶型,采用人工神经网络和遗传算法相结合的优化方法对叶片在低转速工况下进行优化,对优化后离心压气机流场做对比分析。

1 数值模拟

采用的单级离心压气机模型由 1 个离心叶轮和 1 个径向的楔形扩压器组成。其中旋转离心叶轮具有主叶片 12 个和分流叶片 12 个,设计转速为 75 kr/min,楔形扩压器有 20 个叶片。图 1 所示为离心压气机三维模型。

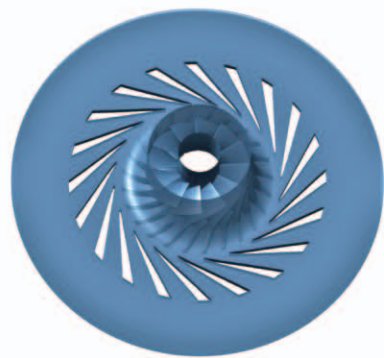


图 1 离心压气机模型

Fig. 1 Centrifugal compressor model

选用 Autogrid5 进行网格划分,在离心叶轮叶片周围默认均采用的 O 型网格,叶轮进出口处采用 H 型网格,叶顶间隙处采用的是 HO 型网格,这是为了更好地分析在旋转叶轮叶顶间隙处的流动情况,在楔形扩压器中也采用 OH 型网格^[12]。为了满足湍流模型对 y^+ 值的要求,第一层网格高度设置为 1×10^{-5} m,叶轮、扩压器通道网格如图 2 所示。为了消除网格数量对计算结果的影响,对网格进行加密,共划分了 126 万、154 万和 188 万 3 套方案。经计算,网格数量达到 154 万时,性能参数几乎不再发生变化,满足计算条件。

采用 NUMECA 软件包中的 FINE/Turbo 模块对离心压气机模型进行数值模拟计算,湍流模型选用 S-A 模型,转静子交界面选用周向守恒型,进口边界条件为轴向进气,进口总压为 101 300 Pa,进口总温为 288 K,湍流粘度为 5×10^{-5} m²/s;出口为平均半径处静压值;除叶轮轮毂外所有壁面设定为绝热固体壁面;离心叶轮叶片与轮毂转速为 75 kr/min。

将全局残差下降 3 个量级以上,同时进口和出口的流量变化率小于 0.5%,认为计算收敛。

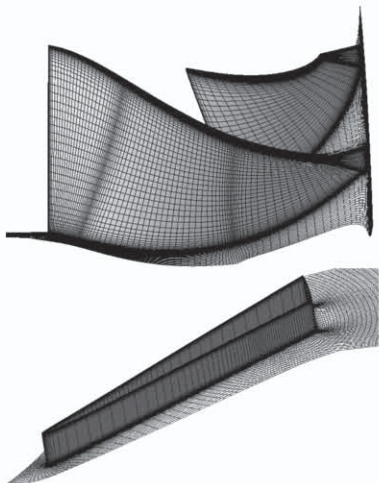


图 2 网格模型
Fig. 2 Grid models

最终得出了在 75,70,65 和 60 kr/min 4 个不同转速和不同背压下流量、绝热效率和总压比的数值模拟计算结果,并分别绘制了流量 - 总压比和流量 - 绝热效率特性曲线,如图 3 所示。

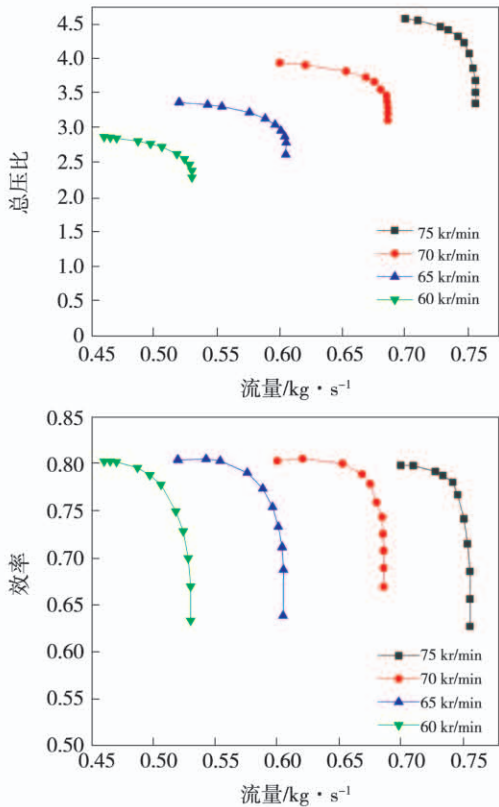


图 3 离心压气机特性曲线

Fig. 3 Characteristic curves of centrifugal compressor

在图 3 曲线中可以看出,离心压气机性能曲线趋势与理论相符,随着转速降低,曲线向左下方偏移,压气机性能降低。在设计流量下将模拟值与设计值进行了对比,结果如表 1 所示。数值模拟计算结果与设计值能够较好地吻合,相对误差在可接受范围内,本数值模拟方法正确可行。

表 1 实验值与模拟值对比

Tab. 1 Comparison of Experimental and simulation values

性能参数	实验值	模拟值
流量/kg · s ⁻¹	0.74	0.742
压比	4.33	4.323
效率	0.792 7	0.779 5

2 叶片参数化及优化设计

图 4 为叶型结构的优化流程。采用人工神经网络和遗传算法相结合的优化方法对此离心压气机离心叶轮的叶型结构进行了优化。优化目标是提高压气机在 60 kr/min 低转速下的稳定工作流量范围、绝热效率和总压比。叶片参数化拟合是优化设计的基础。人工神经网络只能获得有限变量之间的映射关系,遗传算法也只能针对有限的变量进行寻优^[13]。所以将叶型参数化是准确描述原有叶片几何模型必要的方法。NUMECA 软件包中的 AutoBlade 模块的功能是将叶轮机械的三维几何模型转换为参数化拟合模型,目的是为了用一系列的多项式曲线将三维模型数据准确描述出来^[14],本文主要采用 Bezier 曲线和 B 样条曲线对叶片参数化。图 5 所示为 (Z, R) 坐标系下 5 个控制点的两种曲线形式。

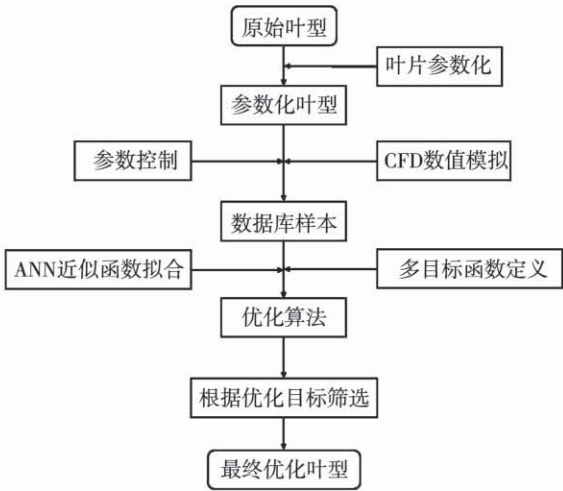


图 4 叶型结构的优化流程图

Fig. 4 Optimization flow chart

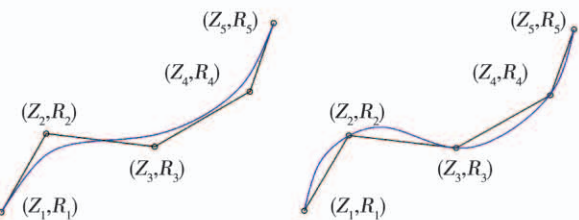


图 5 Bezier 曲线 (左) 与 B 样条曲线 (右) 定义
Fig. 5 Definition of Bezier (left) and B-spline (right)

经过多次尝试后,选取 8 个控制点的 B 样条曲线来对轮毂线和机匣线分别进行拟合。离心叶轮及扩压器叶片流面定义选用线性插分面法,径向分布选取初始二维叶型截面。以前缘积叠作为积叠点,并选取 8 个控制点的 Bezier 曲线定义截面在子午方向和周向的位置^[15]。经多次尝试后发现,主叶片和分流叶片采用“中弧线+厚度分布”的控制方式定义,选取 4 个控制点的 B 样条曲线构造中弧线;厚度分布定义为,原叶片吸力面与压力面采用相同分布规律,并基于 4 个控制点的 Bezier 曲线,对原型叶片厚度分布进行拟合,得到厚度分布规律定义参数化叶片,前缘采用圆头、尾缘采用钝头处理,这种定义方式得到的叶片拟合效果最好。经过以上几步的定义,最终分别完成了对离心叶轮的参数初始化设置,对拟合目标进行拟合计算,得到参数化拟合结果,与原模型几乎吻合,但不完全一致。为了达到更好的拟合效果,共设置了 229 个控制参数,为了验证参数化拟合程度,在 60 kr/min,250 kPa 出口背压下对两个模型进行数值模拟,结果如表 2 所示。两模型计算结果误差很小,参数化拟合结果满足优化过程中数据库的建立要求。

表 2 压气机模型参数化前后性能对比

Tab. 2 Comparison of performances before and after the parametrization of the compressor model

名称	流量/kg·s ⁻¹	压比	绝热效率/%
原模型	0.533 75	2.560 4	68.97
参数化模型	0.529 61	2.563 1	69.65
误差/%	-0.78	0.48	0.99

优化设计是基于 Design3D 平台进行的。选用 CFD_Screening 模块来定义求解流程,此时边界条件

设置为转速 60 kr/min,出口背压 250 kPa,对参数化拟合后的离心压气机模型进行了气动性能模拟,并得到了输出结果。在生成有效的数据库之前,需要进行优化参数设置。由于弯掠特性对离心压气机性能优化的计算量过大,仅对离心叶轮的弯特性进行优化,即把 8 个约束叶轮弯特性的参数重新设定上下界限,通过不断改变这 8 个参数来生成不同的叶轮叶型作为样本,采用 Database_Generation 模块生成一个样本数量为 50 的数据库。

通过构建的数据库来训练人工神经网络,得出预测模型;并结合遗传算法对其寻优,得出预测参数;通过对预测模型进行网格划分和计算,评价该模型,并反馈给样本库进行下一轮的寻优,直到收敛。选取离心压气机绝热效率以及总压比作为目标函数,其中效率期望值为 1.0,总压比期望值为 3.5。由于工作量的原因,优化迭代步数设置为 10 步。

3 优化结果分析

优化后共得出了 10 个优化结果,综合考虑加工工艺和气动性能优化两方面的因素后,最终选取了第 5 步优化迭代得到的叶轮叶型。图 6 为优化前后离心叶轮叶片模型。从图 6 中可以看出,优化后叶轮叶片尾缘叶中到叶顶部分向吸力面一侧弯曲。



图 6 优化前后叶轮模型

Fig. 6 Impeller model before and after optimization

图 7 为优化前后的离心压气机特性曲线。优化后压气机绝热效率除在近失速点稍有降低外,在其他工况点均有所提高,同时压比和稳定裕度有较大提升。压比由 2.624 增加到 2.747,提高了 4.69%;稳定裕度由 15.22% 增加到 17.87%,增加了 17.41%。从优化前后相同边界条件下的特性曲线中可以看出,在此转速下离心压气机的阻塞点流量由 0.53 kg/s 提升至 0.554 kg/s。可见以叶轮弯特性为自由参数的优化方法效果显著。

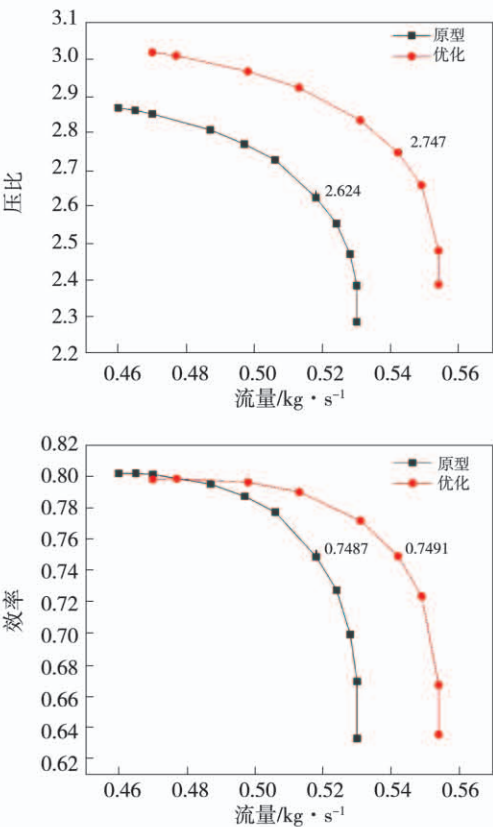


图 7 优化前后压气机特性曲线

Fig. 7 Characteristic curves of compressor before and after optimization

图 8 给出了优化前后子午流道静压分布。从图中可以看出,优化前后在叶轮流道内压力分布无明显变化,优化后扩压器入口前靠近轮毂侧的高压区域面积明显变大,在扩压器流道中变化较为明显,优化后扩压器中各位置静压都有较大幅度提升,其减速扩压效果更好。这说明优化后的离心压气机的增压能力有所提高。

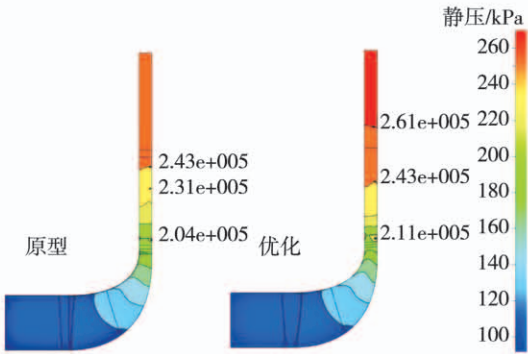


图 8 子午流道静压分布

Fig. 8 Static pressure distribution along meridional flow path

图 9 给出了优化前后离心叶轮叶片表面不同叶高下的静压分布图。从图中可以看出,前 70% 轴向优化后不同高度处的主叶片静压分布几乎相同,后 30% 轴向主叶片吸力面一侧的压升向叶片尾缘移动,在压力面一侧静压稍有增加,有效提高了主叶片的增压能力。在分流叶片叶根和叶片中部,优化后叶片压力面尾缘静压稍稍提升,吸力面静压稍稍减小,也有和主叶片类似的改善,但是在叶顶处扩压能力稍有降低。

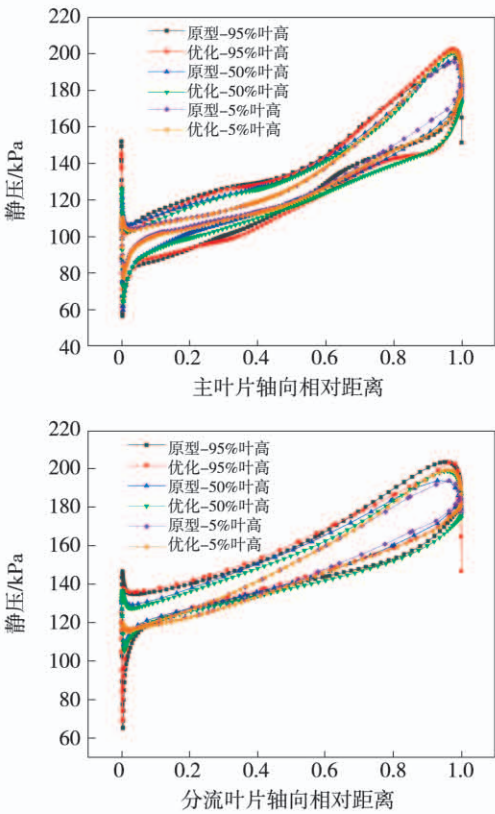


图 9 叶片表面静压分布

Fig. 9 Static pressure distribution along different blade sections

图 10 给出了优化前后叶轮叶片出口流面静压分布图。从图中可以看出,优化后叶轮出口静压在叶片压力面一侧增加,吸力面一侧降低,而且分布更加均匀,有效地改善了离心叶轮出口和无叶过渡段处的流场,可以进一步提高下游扩压器通道内流场的气动性能,这也是优化后压气机压比和稳定裕度提升的重要原因。

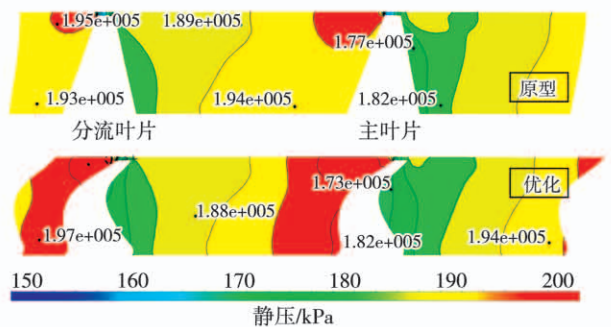


图 10 叶轮出口流面静压分布

Fig. 10 Static pressure distribution of flow area at the outlet of impeller

图 11 给出了优化前后扩压器叶片吸力面的熵分布图。从图中可以明显看出,优化后扩压器叶片吸力表面熵值变化较为明显,优化后前缘靠近叶根部位的高熵区域面积减小很多,熵值也从 $304 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 降低为了 $268 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,降低气流部分能量损失。这也是致使扩压器中总压损失降低的原因,提高了扩压器流道的增压能力,达到了扩稳效果。

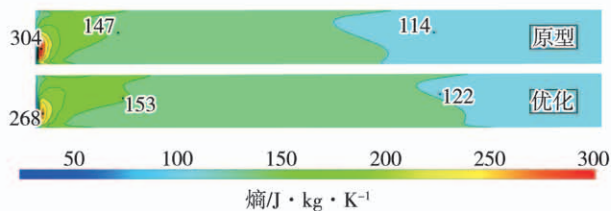


图 11 扩压器叶片吸力面熵分布

Fig. 11 Distribution of entropy on diffuser blade suction surface

4 结 论

(1) 叶型参数化拟合过程中,只有主叶片和分流叶片叶型定义方式对拟合结果影响较大,使用 4 个控制点的 Bezier 曲线来定义吸力面和压力面型线,且前缘采用圆头,后缘采用钝头处理时,主叶片和分流叶片的叶型拟合效果较好。

(2) 基于人工神经网络和遗传算法相结合的优化设计系统具有较高的效率,以叶片弯特性作为优化参数的优化效果显著,优化后压气机在低转速工

况下压比增加了 4.69%,喘振裕度拓宽了 17.41%。

参考文献:

- [1] 刘申旭. 单级离心压气机内部流动分析及结构优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
LIU Shen-xu. Internal flow analysis and structure optimization design of a single stage centrifugal compressor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [2] 唐新姿, 肖 鹏, 蔡 鹏, 等. 变流量工况下小型离心压气机多目标优化设计[J]. 中国机械工程, 2018, 29(16): 1975-1983.
TANG Xin-zi, XIAO Peng, CAI Peng, et al. Multi-objective optimization design of small centrifugal compressors under variable flow conditions[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(16): 1975-1983.
- [3] BONAIUTI D, ARNONE A, ERMINI M, et al. Analysis and optimization of transonic centrifugal compressor impellers using the design of experiments technique[J]. Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme, 2006, 128(4): 786-797.
- [4] CHO S Y, AHN K Y, LEE Y D, et al. Optimal design of a centrifugal compressor impeller using evolutionary algorithms[J]. Mathematical Problems In Engineering, 2012.
- [5] GUO S, DUAN F, TANG H, et al. Multi-objective optimization for centrifugal compressor of mini turbojet engine[J]. Aerospace Science And Technology, 2014, 39: 414-425.
- [6] 张效溥, 王仲林, 田 杰, 等. 基于积叠线的风扇叶片优化与振动特性研究[J]. 航空发动机, 2020, 46(4): 58-64.
ZHANG Xiao-pu, WANG Zhong-lin, TIAN Jie, et al. Study on optimization and vibration characteristics of fan blade based on stack line[J]. Aeroengine, 2020, 46(4): 58-64.
- [7] MA S B, AFZAL A, KIM K Y. Optimization of ring cavity in a centrifugal compressor based on comparative analysis of optimization algorithms[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 138: 633-647.
- [8] SHAABAN S. Design optimization of a centrifugal compressor vaneless diffuser[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 60: 142-154.
- [9] 董素荣, 刘卓学, 张众杰, 等. 基于神经网络和遗传算法的高海拔柴油机离心压气机叶轮优化[J]. 军事交通学院学报, 2018, 20(7): 39-43.
DONG Su-rong, LIU Zhuo-xue, ZHANG Zhong-jie, et al. Optimization of centrifugal compressor impeller of high altitude diesel engine based on neural network and genetic algorithm[J]. Journal of

Military Transportation University,2018,20(7):39-43.

[10] SEO S J,CHOI S M,KIM K Y. Design optimization of a low-speed fan blade with sweep and lean[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy,2008,222(1):87-92.

[11] HALDER PARESH S A. Marine energy turbine performance: effect of blade sweep[C]//International Conference on Advances in Energy Research,2015:245-249.

[12] 李星峰,尹湘云,殷国富. 基于 CFD 和多目标算法的离心叶轮参数优化[J]. 流体机械,2019,47(3):31-36.

LI Xing-feng,YIN Xiang-yun,YIN Guo-fu. Optimization of centrifugal impeller parameters based on cfd and multi-objective algorithm[J]. Fluid Machinery,2019,47(3):31-36.

[13] 罗 明,左志涛,李弘扬,等. 基于 BP 神经网络的离心压气机叶轮多目标优化设计方法[J]. 航空动力学报,2016,31(10):2424-2431.

LUO Ming,ZUO Zhi-tao,LI Hong-yang,et al. Multi-objective optimization design of centrifugal compressor impeller based on BP artificial neural network[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(10):2424-2431.

[14] 曲 锋. 单级轴流压气机气动优化设计[D]. 哈尔滨工程大学,2017.

QU Feng. Aerodynamic Optimization of a Single-stage Axial Compressor[D]. Harbin Engineering University,2017.

[15] 舒信伟,谷传纲,王 彤,等. 一种离心压缩机叶片优化设计方法[J]. 热能动力工程,2008(2):135-139,213-214.

SHU Xin-wei,GU Chuan-gang,WANG Tong,et al. A Method for the Optimized Design of Centrifugal Compressor Blades[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2008(2):135-139,213-214.

(姜雪梅 编辑)

(上接第 118 页)

[6] LIU J. A Novel taguchi-simulated annealing method and its application to airfoil design optimization[C]. AIAA Paper,2005, No. 2005-4858.

[7] WAHID S G,TEMESGENT T M. Optimal geometric representation of turbomachinery cascades using NURBS[J]. Inverse Problems in Science and Engng,2003,11(5):359-373.

[8] HICKS R M,HENNE P A. Wing design by numerical optimization [J]. Journal of Aircraft,1978,15(7):407-412.

[9] WENDLAND H. Radial basis functions[M]. Scattered data approximation,Cambridge,Cambridge University Press,2005.

[10] SEDERBERG T W,PARRY S R. Free-form deformation of solid geometric models[J]. ACM SIGGRAPH computer graphics,1986,20(4):151-160.

[11] ARNONE A,BONAIUTI D,FOCACCI A,et al. Parametric Optimization of a High-Lift Turbine Vane[C]. ASME Turbo Expo: Power for Land,Sea,& Air,2004.

[12] GEORGIA N K,SOTIRIOS S S,IOANNIS K N. A software tool for parametric design of turbomachinery blades[J]. Advances in Engineering Software,2009,40(1):41-51.

[13] HOWELL A R. Fluid Dynamics of Axial Compressors[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,1945,153(1):441-452.

(丛 敏 编辑)