

小流量高压头离心鼓风机叶型优化设计

舒信伟, 谷传纲, 王彤, 肖军

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市 闵行区 200240)

Blade Optimization Design for a Centrifugal Blower With Low Flowrate and High Pressure Head

SHU Xin-wei, GU Chuan-gang, WANG Tong, XIAO Jun

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: An optimization approach to centrifugal blower blade based on uniform design method and computational fluid dynamics (CFD) technique was presented. In this approach, uniform design method was employed to generate the geometric information of samples, whose performances are calculated by CFD technique; the relationship between the geometric information and its performances of samples is mapped by the approximate model constructed by parallel artificial networks (PANN); genetic algorithms is employed to find the global optimal of the approximate model, which is then evaluated by CFD technique and added to the samples database; and the last two steps of the loop are iterated until the stop criterion is satisfied. This proposed approach has been applied to the optimum design of a set of blower blades presented in this paper. The maximum isentropic efficiency is selected as objective function, and a 1.26% improvement of the objective function is obtained. The optimization results show that the proposed optimization approach is effective for the optimum design of blower blade.

KEY WORDS: blower; optimum design; uniform design method; computational fluid dynamics; approximate model

摘要: 提出了一种基于均匀设计方法和计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术的离心鼓风机叶型优化设计方法。均匀设计方法用来生成试验样本点几何信息, 各样本点性能评估分析则借助 CFD 技术来完成, 样本点几何信息与其性能之间的关系则采用并行神经网络所映射的近似模型来给出, 最后由遗传算法来对该近似模型进行全局寻优, 并将其优化得到的相应结果加入样本点集中, 重

复最后两步, 直到满足设定的终止准则。将该优化方法应用于某离心鼓风机叶型优化设计, 以极大化等熵效率为目标函数, 优化后叶轮的等熵效率提高了 1.26%, 说明该优化方法是有效的。

关键词: 鼓风机; 优化设计; 均匀设计方法; 计算流体力学; 近似模型

0 引言

小流量高压头离心鼓风机(风量不大于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$, 升压 20 kPa 左右)是化纤等行业干燥循环系统中最关键的设备之一。以往由于设计和制造的困难, 国内开发的这种小流量高压头离心风机产品, 多采用前向式叶轮风机, 但此种风机存在其流道中流动情况较差, 效率偏低等问题。由于工艺上的要求, 鼓风机必须长年不间断地运行。因此鼓风机是干燥循环系统的“耗电大户”, 优化其结构、提高效率对节约能源、降低生产成本有着重要的意义。

目前应用于叶轮机械优化设计的优化算法有很多, 有基于梯度或灵敏度分析方法^[1]或最近发展起来的伴随矩阵法^[2]、控制理论^[3-4]、模拟退火法^[5-6]、神经网络法^[7-8]、响应面法^[9-10]、反设计法^[11-12]以及遗传算法^[13-16]等。一般很难判定哪种方法一定优于其他方法。如, 就寻优过程的收敛速度来说, 基于梯度法是很快的, 但它不能保证搜索到的解是全局最优的; 然而, 遗传算法可以大大提高搜索到全局最优解的概率, 但可能需要几千次的寻优迭代。由于采用 CFD 技术进行气动性能数值模拟是较为费时的, 因此本文将均匀设计方法^[17-18]、CFD 技术、并行神经网络与遗传算法等相结合, 发展了一种基于均匀设计方法和 CFD 技术的离心鼓风机叶型优化设

基金项目: 国家自然科学基金项目(50776056); 国家863高技术基金项目(2006AA05Z250)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50776056); The National High Technology Research and Development of China (863 Programme)(2006AA05Z250).

计方法。并将该方法应用于某小流量高压头离心鼓风机叶片的优化设计,以得到更优的设计方案。

1 叶型参数化

本文的研究对象是某一小流量高压头离心鼓风机叶片,优化目的是通过改变叶片形状提高其性能。该叶轮在轴向是等宽的,为较好地组织气体流动,叶片形状在径向的厚度是不等的。为保证强度等要求,叶轮由不锈钢加工和焊接而成。为缩小优化变量空间和较好地表达叶型,如图1所示采用具有保凸性和光滑性的Bezier曲线分别对叶片的压力面和吸力面进行参数化表示。具体的Bezier曲线表达式为

$$\mathbf{Q} = \sum_{j=0}^5 P_j B_{5,j}(t) \quad (1)$$

式中:向量 $\mathbf{Q}\{x(t), y(t)\}^T$ 为叶片的型值点坐标, $t \in [0, 1]$; 向量 $P_j\{\xi_j, \eta_j\}^T$ 为Bezier曲线特征多边形的顶点坐标; 5阶的Bernstein多项式的表达式为

$$B_{5,j} = C_5^j t^j (1-t)^{5-j}, j = 0, 1, \dots, 5 \quad (2)$$

为减少设计变量的个数,可通过固定Bezier曲线特征多边形控制点的横坐标或纵坐标,选其另一坐标为设计变量。本次优化将 $\xi_3^P, \xi_4^P, \xi_3^S, \xi_4^S, \beta_2, \theta, \delta$ 选为设计变量。几何约束条件为 $\alpha=20^\circ, \beta_1=135^\circ$ 及设计变量的给定变化范围。

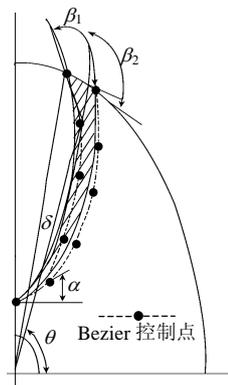


图1 叶型参数化

Fig. 1 Blade parametric representation

2 优化方法及其流程

2.1 并行神经网络

神经网络模型是以神经元的数学模型为基础来描述的,由网络拓扑、节点特点和学习规则来表示。由于人工神经网络有着较强的非线性模型逼近能力等优点,在设计过程中得到广泛的应用。对于如本文离心鼓风机优化设计等类似问题,网络的输

出是多个的。虽然可以用一个网络来映射多个输出,但其训练的难度大大增大,从而可能造成训练时误差的收敛速度变得缓慢,甚至无法收敛。因此,本文提出并行神经网络(PANN)的思想,即对于同一个输入向量,用多个具有相同或不同的拓扑结构和不同的权值矩阵的单元网络映射多个非线性输出,其中每个单元网络映射一个输出,其拓扑结构如图2所示。本次设计单元网络采用3层BP网络,传递函数分别为双极性Sigmoid函数和线性函数,学习算法采用共轭梯度反向传播算法,单元网络的拓扑结构如图2所示。

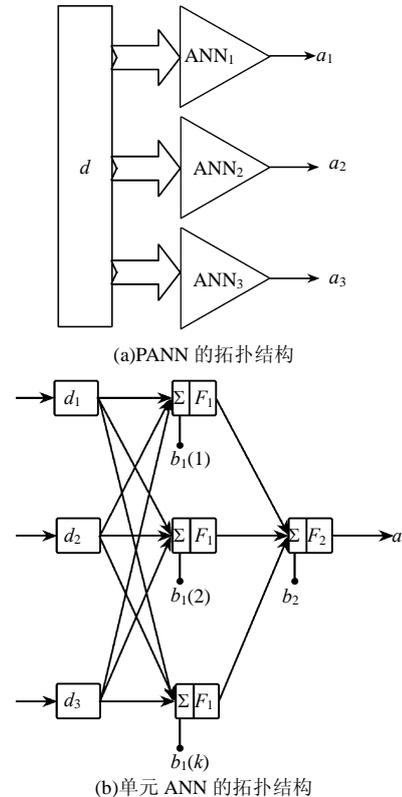


图2 PANN及其单元ANN的拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of PANN and its unit ANN

单元网络的学习误差 ε 定义为输出层的均方差,其表达式为

$$\varepsilon = (F_2(\sum_{j=1}^k W_j F_1(\sum_{i=1}^m W_{ji} d_i - b_1(j)) - b_2) - a)^2 \quad (3)$$

式中: F_1 和 F_2 分别为隐层和输出层的传递函数, d_i 和 a 分别为学习样本的输出值和其正确的输出值, W_{ji} 和 W_j 为网络的权值系数, $b_1(j)$ 和 b_2 分别为隐层和输出层的偏置, m 和 k 分别为输入层和隐层神经元的数量。

2.2 改进的等级公平竞争遗传算法

为避免基本遗传算法存在的早熟或陷入停滞现象等问题,受自然界和人类社会进化现象的启

发, 本文发展了一种新的遗传算法——改进的等级公平竞争遗传算法(improved hierarchical fair competition genetic algorithms, IHFCGA)。该算法引入等级公平竞争模型^[19], 有效地保证了竞争的公平性并防止过早收敛; 将动态小生境进化思想和自适应的进化策略引入等级公平竞争模型, 可以提高算法的搜索效率, 有效保持种群的多样性, 防止算法出现停滞和早熟现象; 为了保证每一代的优良个体不被破坏, 采用精英保持策略, 使它们直接复制到下一代中。

IHFCGA的程序流程为: 首先随机生成一个规模为 N 的种群; 然后进行个体适应度评价, 并按适应度大小进行排序分成 N_g 组子种群; 接着对各子种群分别进行交叉和变异遗传操作; 经过 N_g 代的进化后, 把所有的子种群进行合并, 并对这个新种群进行交叉和变异遗传操作, 再应用动态小生境技术对种群进行筛选, 这样当前的子代演化成下一代父代。如此一代代进化下去, 逐渐演化出越来越好的个体, 直至满足设定的收敛条件。

算法的全局寻优性能已经过典型的多峰值测试函数Shubert函数测试^[20], 寻优结果显示IHFCGA可以较快得找到全局最优值, 同时也显示了其有着很强的健壮性。

2.3 优化流程

优化的流程如图3所示。为缩小优化过程中设计变量的寻优空间, 首先对用Bezier函数对叶型进行参数化, 得到了相对少的设计变量来较好地描述叶型。接着为减少试验误差的影响, 改善设计空间的表达, 选用适合多变量优化的均匀设计方法来生成初始的空间样本点。样本点的性能评估采用FINE/Turbo软件求解来完成, 湍流模型选用Spalart-Allmaras模型, 采用多重网格、局部时间步长和残差光滑技术以获得较快的收敛速度。边界条

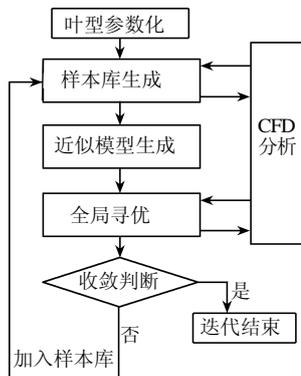


图 3 优化流程图

Fig. 3 Flowchart of the optimization approach

件: 进口给定总温、总压和气流角(轴向进气), 出口给定质量流量, 叶片及内外环壁为无滑移、绝热壁面。因此优化过程中流量是不变的, 即满足了约束条件。样本点几何信息与其性能之间的近似模型的构建是决定优化方法性能优劣的关键之一, 本文采用映射效率较高的PANN来实现。IHFCGA则对该近似模型进行全局寻优, 并将其计算得到的相应结果加入样本点集中, 循环最后两步迭代直到满足设定的终止准则, 得到优化结果。

3 优化过程及结果分析

流量、压比和效率等是离心鼓风机的主要性能指标, 本次优化设计是针对设计工况进行的, 把极大化等熵效率作为目标函数, 约束条件包括第 1 节给出的几何约束条件和流量和总压比不小于初始叶轮为性能约束条件, 约束条件的处理采用罚函数法, 优化设计的表达式为

$$\max F_{\text{obj}} = \eta_{\text{isen}} + P_{\text{Geom}} + P_{\text{Perf}} \quad (4)$$

式中: F_{obj} 为优化设计的目标函数; η_{isen} 为离心鼓风机的等熵效率; P_{Geom} 和 P_{Perf} 分别几何和性能的惩罚项。

本次的优化对象是某小流量高压头的离心鼓风机叶轮, 在设计工况下其初始等熵效率为 83.91%, 总压比为 1.346。优化的目的是在一个可以接受的优化设计周期内, 通过改变叶片形状, 找到一个更优的设计方案, 使优化目标有一定的提高。图 4 比较了 $r-\theta$ 平面上优化前后叶片的形状。优化叶型整体上向吸力面方向移动, 且叶片厚度薄于初始叶型。优化叶型的前弯程度和厚度均小于初始叶型, 这样的变化对改善流道中的流动情况和减小尾迹损失是有利的。图 5 给出了优化过程中目标函数等熵效率的收敛过程。图 6 给出了优化前后叶轮出口在 50% 叶高截面上静压、总压分布。从图中可以清楚看出, 优化叶型无论是静压分布还是总压分布均整体上高于初始叶轮, 且 3 个叶高处分布更为均匀, 这对减小二次流损失是有利的。同样, 优化前后叶轮出口在 15% 和 85% 叶高处的静压、总压亦有类似的分布, 限于篇幅未给出。图 7 比较了优化前后流道在 50% 叶高处的熵云图。2 种叶型最大的熵增都位于流道的中间部位, 叶片的压力面最小, 吸力面介于前两者之间。优化后流道中的熵增较初始叶型整体上有一定的降低, 特别是流道的中部和吸力面侧尤为明显, 因此优化叶型的流动损失

低于初始叶型。优化后叶轮的总压比为 1.358，等熵效率为 85.17%，比初始叶型分别提高了 0.89%、1.26%。

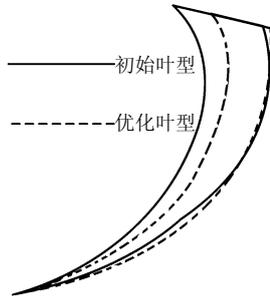


图 4 优化前后叶型比较

Fig. 4 Comparison of the original and optimized blade profiles

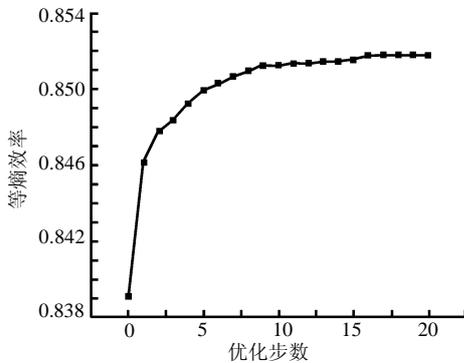


图 5 优化目标函数收敛曲线

Fig. 5 Convergence history of objective function

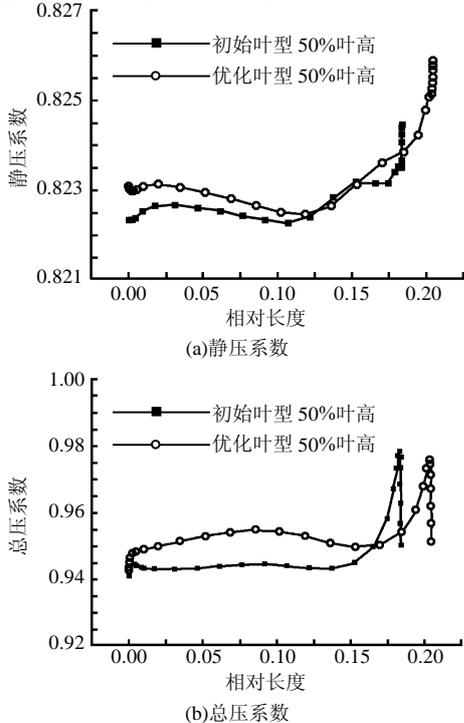
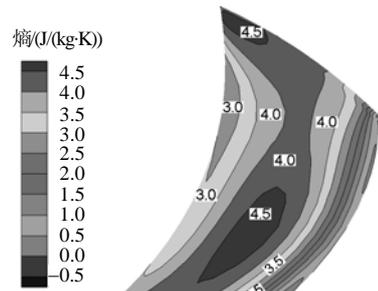
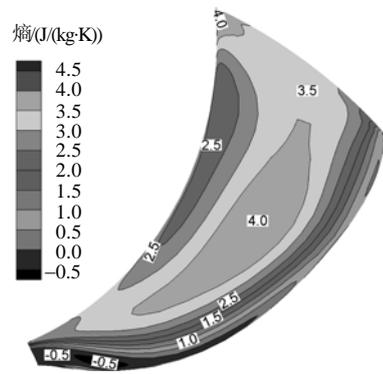


图 6 优化前后叶轮出口不同叶高处压力系数比较

Fig. 6 Comparison of pressure coefficient at mid-span of impeller outlet



(a) 初始叶型



(b) 优化叶型

图 7 优化前后流道在 50%叶高处熵云图比较

Fig. 7 Comparison of entropy contours at channel mid-span

4 结论

将叶型参数化、试验设计方法、PANN、IHFCGA 和 CFD 等技术相结合，发展了一种基于均匀设计方法和 CFD 技术的离心鼓风机叶型优化设计方法。把并行思想和基于共轭梯度算法的神经网络相结合，发展了一种 PANN，加快了网络训练时误差的收敛速度和提高了网络的映射精度。典型的测试函数寻优结果表明，本文发展的 IHFCGA 有着良好的全局寻优能力。从优化过程可以看出，相对短的优化设计周期要归功于由映射效率较高的 PANN 给出的样本点的几何信息与其性能之间的近似模型，它同时又给全局寻优能力较强的 IHFCGA 的有效应用提供了便利。该方法可以很好地处理几何和气动等方面的目标函数及相应的约束条件，适于多设计变量的优化设计问题。

将该优化设计方法应用于某小流量高压头离心鼓风机叶轮优化设计。优化结果表明，优化后叶轮在满足约束条件的前提下，优化目标函数等熵效率提高了 1.26%，说明该优化方法是有效的。

参考文献

- [1] Burguburu S, Toussaint C, Bonhomme C, et al. Numerical optimization of turbomachinery bladings[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126(1): 91-100.
- [2] Arensa K, Rentropa P, Stollb S O, et al. An adjoint approach to optimal design of turbine blades[J]. Applied Numerical Mathematics, 2005, 53(2): 93-105.
- [3] Gu C G, Miao Y M. Blade design of axial-flow compressors by the method of optimal control theory. I: Physical model and mathematical expression[J]. ASME Journey of Turbomachinery, 1987, 109(1): 99-102.
- [4] Gu C G, Miao Y M. Blade design of axial-flow compressors by the method of optimal control theory. II: Application of Pontryagin's maximum principles, a sample calculation and its results[J]. ASME Journey of Turbomachinery, 1987, 109(1): 103-107.
- [5] Wang X, Damodaran M. Comparison of deterministic and stochastic optimization algorithms for generic wing design problems[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(5): 929-932.
- [6] Wang X J, Damodaran M. Aerodynamic shape optimization using computational fluid dynamics and parallel simulated annealing algorithms[J]. AIAA Journal, 2001, 38(8): 1500-1508.
- [7] Pierret S, Van Den Braembussche R A. Turbomachinery blade design using a Navier-Stokes solver and artificial neural network[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1999, 121(2): 326-332.
- [8] 谷传纲, 阎昉, 王彤. 采用改进的 BP 神经网络预测离心通风机能的研究[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(3): 43-48.
Gu Chuangang, Yan Fang, Wang Tong. Improved neural network for predicting performance of centrifugal fans[J]. Journal of XI'AN Jiaotong University, 1999, 33(3): 43-48(in Chinese).
- [9] Simpon T W, Peplinski J, Koch P N, et al. On the use of statistics in design and the implications for deterministic computer experiments [C]. Proceedings of DETC'97, California, USA, 1997: 1-10.
- [10] 王晓锋, 席光, 王尚锦. 离心压缩机叶轮的响应面优化设计 I: 设计方法[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(3): 408-410.
Wang Xiaofeng, Xi Guang, Wang Shangjin. Response surface methodology for centrifugal compressor impeller optimization design part I: design method[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(3): 408-410(in Chinese).
- [11] Obayashi S, Takanashi S. Genetic optimization of target pressure distributions for inverse design methods[J]. AIAA Journal, 1996, 34(5): 881-886.
- [12] Veress A, Braembussche R. Inverse design and optimization of a return channel for a multistage centrifugal compressor[J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(5): 799-806.
- [13] Trigg M A, Tubby G R, Sheard A G. Automatic genetic optimization approach to two dimensional blade profile design for steam turbines [J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(1): 11-17.
- [14] Aly S, Ogot M M, Pelz R. Stochastic approach to optimal aerodynamic shape design[J]. Journal of Aircraft, 1996, 33(5): 956-961.
- [15] 童彤, 丰镇平, 李军. 遗传算法在透平叶栅多目标优化设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 85-88.
Tong Tong, Feng Zhenping, Li Jun. Application of genetic algorithm to multiobjective optimization design for turbine cascades [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 85-88(in Chinese).
- [16] 李军, 邓清华, 丰镇平. 基于进化算法的压气机叶型多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 205-209.
Li Jun, Deng Qinghua, Feng Zhenping. Multiobjective optimization design of compressor airfoil using evolutionary algorithms [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 205-209(in Chinese).
- [17] 方开泰. 均匀设计—数论方法在试验设计的应用[J]. 应用数学学报, 1980, 3(1): 363-372.
Fang Kaitai. Uniform design—Application of number theory to exp methods in experimental design[J]. Acta Mathematica Applicatae Sinica, 1980, 3(1): 363-372(in Chinese).
- [18] Wang Yuan, Fang Kaitai. A note on uniform distribution and experimental design[J]. Kexue Tongbao, 1981, 26(6): 485-489.
- [19] Hu J J, Goodman E D, Seo K S, et al. Adaptive Hierarchical Fair Competition (AHFC) model for parallel evolutionary algorithms [C]. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, New York, USA, 2002: 772-779.
- [20] 舒信伟, 谷传纲, 杨波, 等. 基于小生境遗传算法和 RANS 方程的平面叶栅气动优化设计[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 48-53.
Shu Xinwei, Gu Chuangang, YANG Bo, et al. Aerodynamic optimization for cascade blade based on Niche gas and RANS equation[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 48-53(in Chinese).

收稿日期: 2007-12-17.

作者简介:

舒信伟(1978—), 男, 浙江衢州人, 博士研究生, 主要研究方向为叶轮机械气动性能优化设计和试验研究等, sjtusxw@126.com;

谷传纲(1946—), 男, 浙江温州人, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为叶轮机械内部流动机理研究, 优化设计和试验研究等;

王彤(1969—), 甘肃兰州人, 女, 副教授, 主要研究方向为叶轮机械内部流动和系统分析等;

肖军(1979—), 男, 安徽合肥人, 博士研究生, 主要研究方向为叶轮机械气动热力学数值模拟和试验研究等。

(责任编辑 王庆霞)