

基于人工蜂群算法与 NURBS 的吸附式 叶型优化设计

杨小东, 刘 波, 张国臣, 那振喆

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为提高轴流压气机吸附式叶型优化设计的质量,设计了一套基于人工蜂群(ABC)算法和非均匀有理 B 样条(NURBS)的自动优化设计系统. 对人工蜂群算法的运行机制进行了深入分析,并与目前广泛使用的遗传算法(GA)进行了对比. 对比发现人工蜂群算法可以更好地逼近全局最优值且收敛效率提高 50%. 使用 NURBS 对叶型进行参数化,并研究了参数化过程中的畸变问题. 将抽吸参数与叶栅参数同时作为优化变量,使用该系统对一吸附式叶栅进行了优化. 结果显示:抽吸槽设置在 58.44%轴向弦长位置处流动损失下降明显,与优化前未抽吸叶型相比流动损失降低 64.8%,气流分离得到有效抑制.

关 键 词: 人工蜂群算法; 非均匀有理 B 样条 (NURBS); 叶型优化; 吸附式叶栅; 轴流压气机

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Optimization of aspirated airfoil based on artificial bee colony algorithm and NURBS

YANG Xiao-dong, LIU Bo, ZHANG Guo-chen, NA Zhen-zhe

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To improve the optimization design quality of aspirated airfoil of axial compressor, an automatic optimization system was developed based on artificial bee colony (ABC) algorithm and non-uniform rational B-splines (NURBS). The mechanism of ABC algorithm was researched and the performance was compared with genetic algorithm (GA) commonly used at present. The comparison indicated that ABC algorithm can obtain better global optimum and the convergence speed was 50% higher than GA. NURBS was applied to parameterize the airfoil and distortion problems in the process were studied. The optimization system was validated by optimizing an aspirated cascade, both parameters of the profile and the suction settings were treated as optimization variables. Results show that the best suction location which could bring the most performance improvement is at about 58.44% axial chord length. 64.8% decrease of the flow loss is obtained if compared with the initial cascade and the separation of the flow is restrained.

Key words: artificial bee colony algorithm; non-uniform rational B-splines (NURBS); airfoil optimization; aspirated cascade; axial compressor

吸附式压气机设计技术由美国麻省理工学院 (MIT) 的 Kerrebrock 等^[1]于 1997 年首次提出.

该技术是在叶片吸力面上的强逆压梯度处吸除附面层,使气流在叶型后段以完全附着的方式实现

收稿日期: 2013-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(51236006)

作者简介: 杨小东(1986—),男,安徽淮北人,博士生,主要从事叶轮机械气动优化设计方面的研究.

叶片气动弯角的增加,进而提高压气机整体做功能力,减少因气流分离造成的(流动)损失.自从吸附式压气机设计理念提出以来,附面层吸除技术在高负荷、高效率压气机设计研究中逐渐成为一极具前途的研究方向,国内外的学者陆续开展了相关研究. Merchant^[2]在具有高负荷叶型的压气机中采用附面层抽吸技术,在附面层分离的起始位置进行抽吸,当抽吸流量比达到3.5%时,级压比高达3.0,同时指出抽吸量和抽吸位置的选择对于吸气效果有重要影响. Carter等^[3]对69°叶型折转角的平面叶栅采用附面层吸除的实验结果表明,采用较小的抽吸量就可以显著降低流动损失,改善叶栅内流动. 宋彦萍、张华良等^[4-5]通过数值模拟研究了抽吸对压气机叶栅气动性能的影响,结果表明:通过抽吸可以明显改善压气机叶栅的气动性能,同时指出抽吸量和抽吸位置对压气机叶栅性能的改善具有重要影响. 陈绍文等^[6-7]使用数值模拟进一步验证了抽吸对压气机叶栅气动性能的改善,并在一低速叶栅风洞上对不同抽吸量和抽吸位置的高负荷吸附式压气机叶栅进行了实验研究,分析了抽吸位置和抽吸量对高负荷吸附式压气机叶栅流场的影响.

上述研究已明确指出抽吸位置和抽吸量对于抽吸效果影响显著,但尚无确切的抽吸设计法则可供参考. 因此,目前设计吸附式叶栅多是在现有叶栅的基础上通过初步的数值分析后便直接手动择位进行开槽,并且抽吸量也是通过数次计算后大致给定的. 这种“试凑”法对于存在大分离的叶栅是有一定的效果,即便如此,仍无法保证所选的抽吸位置、抽吸量,甚至加入了抽吸之后的原始叶型是最优的. 针对这一问题,本文开发了一套吸附式叶型优化设计系统,对现有叶栅进行优化设计,在叶型优化的同时考虑抽吸影响. 使用具有更强寻优能力的人工蜂群算法对吸附式叶型进行优化.

1 优化策略:人工蜂群(ABC)算法

在工程优化领域,遗传算法(GA)^[8]已被广泛采用,但遗传算法存在着收敛速度慢,求解高维问题时易早熟陷入局部最优等固有缺陷,且算法的操作较为繁琐,参数不易选取. 近年来,基于群智能的算法,如蚁群算法^[9]、粒子群算法^[10]等逐渐成为研究热点,其在神经网络训练、函数优化、工程优化等领域表现出了优于遗传算法的性能. 人工蜂群算法^[11]是一种新型的群智能算法,由Karaboga于2005年提出,文献^[12]中明确指出

其与差分进化算法、粒子群算法等相比可获取更佳的性能测试结果,是一种优秀的函数优化方法之一,且具有设置参数少,计算简单等优点,具有广阔的工程应用前景.

1.1 人工蜂群算法的基本原理

在人工蜂群算法中,蜂群由采蜜蜂、待工蜂和侦察蜂组成^[13]. 采蜜蜂所采蜜源对应着优化问题的可行解. 初期,蜂群被等分为采蜜蜂和待工蜂. 采蜜蜂外出采蜜,归来后通过摇摆舞将蜜源的位置、数量等信息传递给待工蜂,待工蜂根据获得的信息以一概率选择自己将要开采的蜜源. 为了提高算法的全局收敛性,若采蜜蜂寻找到的蜜源的质量在一定循环次数后仍然没有提高,则放弃当前蜜源,采蜜蜂转变为侦察蜂,继续寻找新的蜜源. 人工蜂群算法包括以下基本步骤:

1) 初始化蜜蜂种群. 在初始时刻,随机生成生成 N 个可行解 $(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N)$

$$\mathbf{X}_i^j = \mathbf{X}_{\min}^j + \text{rand}(0,1)(\mathbf{X}_{\max}^j - \mathbf{X}_{\min}^j) \quad (1)$$

式中 $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ 为 D 维解向量的某个分量, $\mathbf{X}_i^j$ 表示第 i 个体的第 j 个分量, $\text{rand}(0,1)$ 表示 $(0,1)$ 之间的随机数.

2) 按照种群适应度大小,将蜜蜂分为采蜜蜂和待工蜂两种. 在该步中,计算由步骤1)生成的各解向量的适应度值,并按由大到小的顺序进行排列,选择前 $N/2$ 个蜜蜂作为采蜜蜂.

3) 对于每只采蜜蜂,继续在原蜜源附近采蜜,搜索其他蜜源,并计算其适应度值,若其适应度值更高,则取代原蜜源. 搜索蜜源的公式为

$$\mathbf{V}_i^j = \mathbf{X}_i^j + \varphi_i^j(\mathbf{X}_i^j - \mathbf{X}_k^j) \quad (2)$$

式中 $j \in \{1, 2, \dots, D\}$, $k \in \{1, 2, \dots, N/2\}$, 且 $k \neq i$, φ 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数.

采用贪婪选择算子在采蜜蜂搜索到的新位置向量 $\mathbf{V}$ 和 $\mathbf{X}$ 中选取具有更优适应度的保留给下一代的种群. 其概率分布为

$$P\{T_s(\mathbf{X}_i, \mathbf{V}_i) = \mathbf{V}_i\} = \begin{cases} 1 & f(\mathbf{V}_i) \geq f(\mathbf{X}_i) \\ 0 & f(\mathbf{V}_i) < f(\mathbf{X}_i) \end{cases} \quad (3)$$

4) 对于每只待工蜂,按照与蜜源适应度值成比例的概率,选择一个蜜源,并在其附近进行采蜜,寻找其他蜜源,若新产生的蜜源适应度值更高,则待工蜂变为采蜜蜂,并取代原蜜源位置. 待工蜂选择蜜源的选择概率为

$$P\{T_s(\mathbf{X}) = \mathbf{X}_i\} = \frac{f(\mathbf{X}_i)}{\sum_{m=1}^{N_c} f(\mathbf{X}_m)} \quad (4)$$

式中 N_e 为采蜜蜂的个数。

5) 若搜寻次数超过一定限制,仍没有找到具有更高适应度值的蜜源,则放弃该蜜源,并重新初始化生成一个新的蜜源。

6) 记录下至今为止的最优蜜源,并跳至步骤2),直至算法收敛。

1.2 算法测试

选用了3个典型的经常用于算法测试的函数对人工蜂群算法进行测试,并与当前主流的遗传算法进行了对比。测试函数分别为 Sphere, Rastrigin, Griewank 函数。

Sphere 函数的方程为

$$\min f(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (5)$$

如图1所示, Sphere 函数为单极值函数,在其定义域内有一个极小值,亦即全局最小值,其值在 $\mathbf{X}=(0,0,\dots,0)$ 时取得。

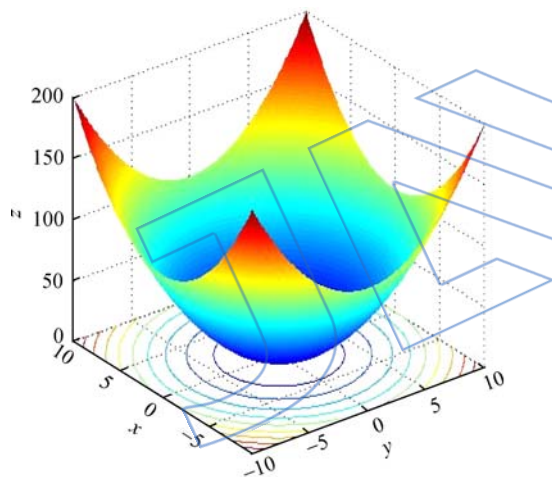


图1 Sphere 函数,定义域为 $[-10,10]$

Fig.1 Sphere function, defined in $[-10,10]$

Rastrigin 函数为

$$\min f(\mathbf{X}) = 2n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i)] \quad (6)$$

与 Sphere 函数相比, Rastrigin 函数增加了余弦函数的调制,其图形如图2所示,在 Sphere 函数的图形的表面,由余弦函数调制出多个极值点,更难求解。

Griewank 函数的形式为

$$\min f(\mathbf{X}) = \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) / 4000 - \prod_{i=1}^n \cos \left(\frac{x_i}{\sqrt{i}} \right) + 1 \quad (7)$$

Griewank 函数在定义域 $[-10,10]$ 中的三维图形如图3所示。余弦函数的影响较 Rastrigin

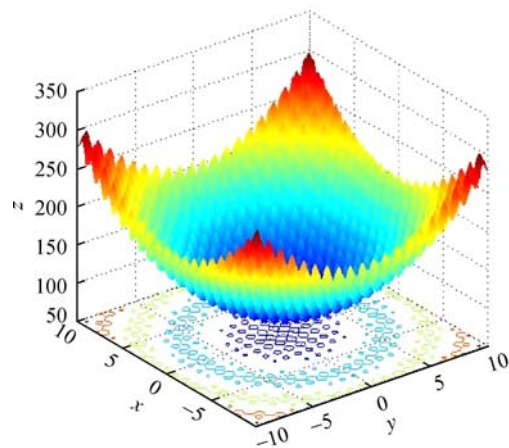


图2 Rastrigin 函数,定义域为 $[-10,10]$

Fig.2 Rastrigin function, defined in $[-10,10]$

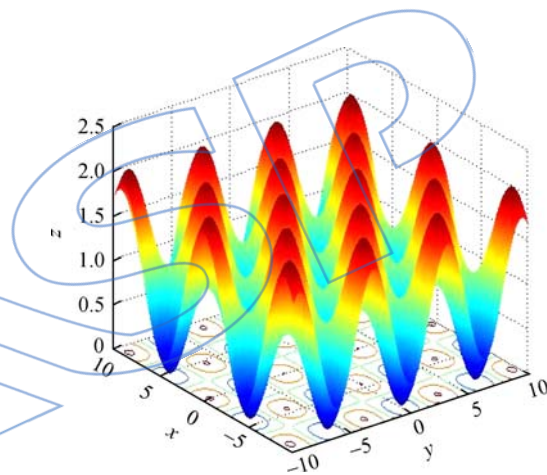


图3 Griewank 函数,定义域为 $[-10,10]$

Fig.3 Griewank function, defined in $[-10,10]$

函数更为明显,各极值点之间存在明显的数值“悬崖”,极难优化。

在函数测试中,人工蜂群算法种群规模设置为40,搜索限制次数为100,最大迭代次数为200。遗传算法种群规模为50,交叉概率为0.6,变异概率为0.01,进化代数为200。各优化函数的维数为5,定义域为 $[-100,100]$ 各算法均独立运行20次,然后取平均值,以减小随机误差。测试结果如表1所示。

表1 3种函数算法测试结果

Table 1 Test results of three function algorithms

函数	最佳值	ABC 算法	GA
Sphere	0	0	2.241716
Rastrigin	0	0	88.767496
Griewank	0	0.008695	0.163104

对于 Sphere 函数和 Rastrigin 函数,人工蜂群算法均可求得准确值,在求解 Griewank 函数时,误差在 10^{-3} 范围内,各函数优化结果的质量明显优于标准遗传算法。

人工蜂群算法与遗传算法在函数测试中的收敛情况如图 4~图 6 所示。由图可见,人工蜂群算法在初期可迅速缩小搜索区域,加快收敛速度。同时由于引入侦察蜂模式,使得算法在后期仍可充

分保持种群的多样性,避免陷入局部最优。与遗传算法相比,人工蜂群算法在求解精度及速度上均具有明显的优势。

2 NURBS 参数化方法

NURBS 是一种先进的参数化曲线、曲面造型方法,近年来已经被广泛地应用在计算机辅助设计/计算机辅助制造(CAD/CAM)和计算机图形学等领域中,并得到了众多国际标准如 Standard for the Exchange of Produce Model Data (STEP), Initial Graphics Exchange Specification (IGES), Open Graphics Library (OpenGL) 等的支持。与 Bezier 曲线相比,NURBS 曲线的局部修改能力更强,更符合实际的优化需求。NURBS 曲线的定义如下:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \omega_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \omega_i} \quad (8)$$

式中 $\{P_i\}$ 为控制点, $\{\omega_i\}$ 为权因子, $\{N_{i,p}(u)\}$ 是定义在非周期且非均匀节点上的 p 次 B 样条基函数。

轴流压气机叶型与单一曲线相比更加复杂,其前后缘为小半径的圆弧或椭圆弧,叶型中段为一自由曲线,用一条 NURBS 曲线直接拟合这样的型线目前尚存在一定难度且拟合精度较低。为提高拟合精度,本文采用分段 NURBS 曲线拟合物型吸力面、压力面型线。吸力面、压力面前后缘分别用一条 5 个控制点的 3 次 NURBS 曲线进行最小二乘拟合,中段自由曲线用一条 8 个控制点的 3 次 NURBS 曲线进行拟合,其中吸力面的拟合效果在图 7 中给出。

叶型参数化后得到的 NURBS 曲线的控制点共 36 个(吸、压力面各 18 个),将叶型控制点及抽吸位

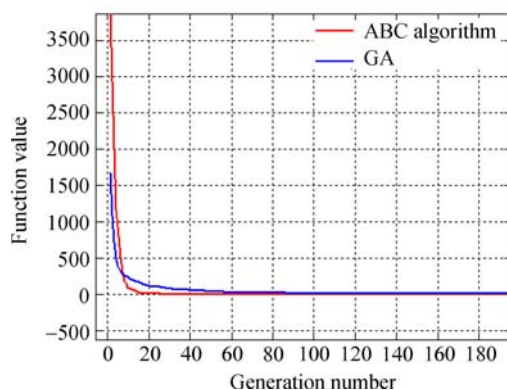


图 4 Sphere 函数优化收敛过程图

Fig. 4 Convergence history of Sphere function

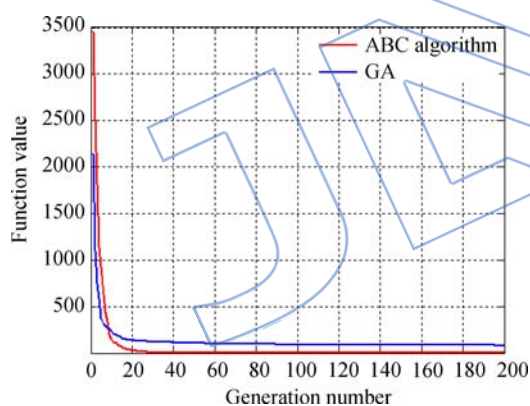


图 5 Rastrigin 函数优化收敛过程

Fig. 5 Convergence history of Rastrigin function

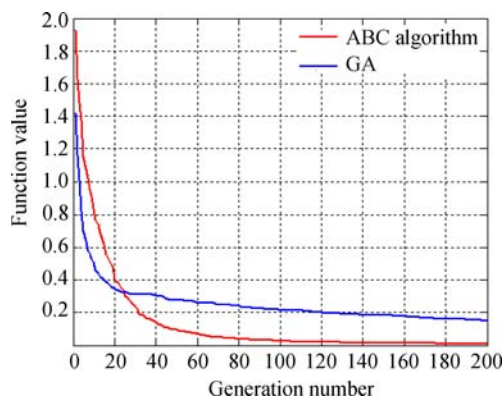


图 6 Griewank 函数优化收敛过程

Fig. 6 Convergence history of the Griewank function

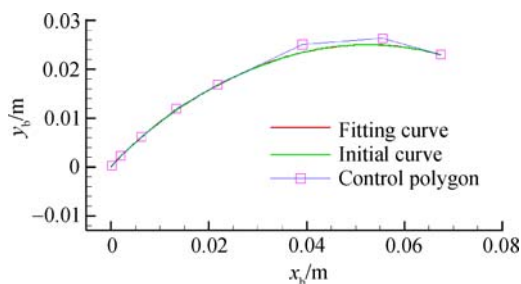


图 7 叶型吸力面 NURBS 曲线拟合

Fig. 7 Fitting results of suction side of the airfoil in NURBS

置和抽吸量一同作为优化变量,使用人工蜂群算法对其进行寻优,以达到吸附式叶型优化的目的。

3 优化设计系统构建与实验

本文以一套内部实验叶栅作为研究对象,实验叶栅的具体参数在表 2 中给出,使用上述参数化方法对实验叶栅吸力面、压力面型线进行参数化,将叶型的几何控制点连同抽吸槽的位置和抽吸量作为优化变量,使用人工蜂群算法进行寻优,达到优化设计的目的。吸附式叶型的气动性能计算由 MISES 程序完成。

表 2 实验叶栅参数

Table 2 Parameters of the cascade

参数	数值
轴向弦长/mm	65
进口几何角/(°)	47.08
出口几何角/(°)	-1.98
叶栅安装角/(°)	21.27
设计马赫数	0.7
设计攻角/(°)	-1

3.1 MISES 求解器验证

MISES 因其计算结果可靠,收敛速度快,在压气机叶栅的设计与分析中得到广泛应用^[14-17]。为验证其可靠性,本文选定设计攻角,分别在 0.5 和 0.7 两个不同的进口马赫数下使用 MISES 对文中实验叶栅的 S_1 流场进行了计算,并将得到的表面马赫数 Ma 与实验值进行了比较。MISES 计算采用 H 型网格,如图 8 所示,沿栅距方向网格数(即流线数)为 20,沿流线方向网格数为 262,总网格数为 5 240,进口边界条件给定进口气流角,出口边界条件给定背压。对比结果在图 9~图 10 中给出。

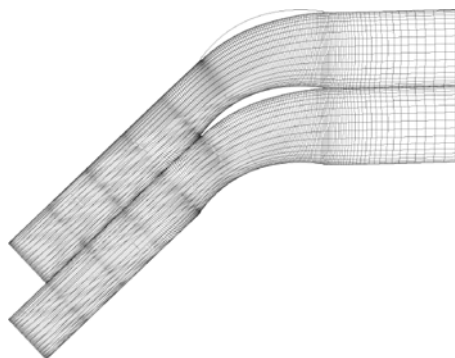


图 8 MISES 中的计算网格

Fig. 8 Computational grid in MISES

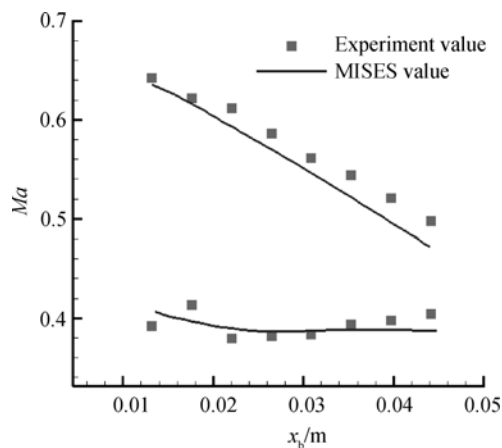


图 9 进口马赫数为 0.5 时表面马赫数计算值与实验值对比

Fig. 9 Comparison of computation and experiment surface Mach number with the inlet Mach number 0.5

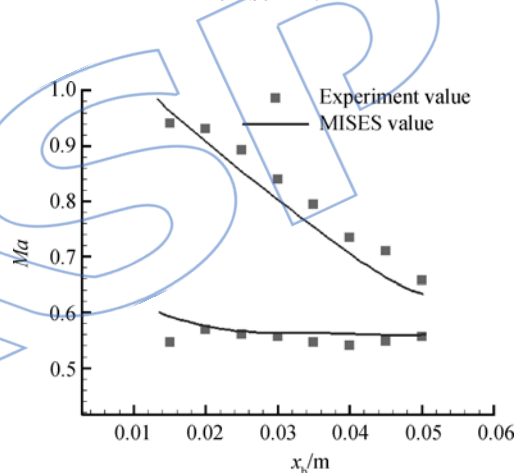


图 10 进口马赫数为 0.7 时表面马赫数计算值与实验值对比

Fig. 10 Comparison of computation and experiment surface Mach number with the inlet Mach number 0.7

从图 9~图 10 中可以看出,在所选的 2 个进口马赫数下,MISES 计算得到的叶片表面马赫数分布与实验值基本吻合。与实验值相比,计算所得的吸力面表面马赫数偏低,但误差在允许范围之内。

3.2 优化变量扰动量的确定

由于 NURBS 曲线具有局部修改特性,当控制点较多(多于 4 个)时,个别控制点的不规则大幅度移动将会在型线的局部产生大的凹坑或凸起,如图 11 所示,这种畸变叶型的产生将会误导算法的优化方向,使得最后的优化结果没有任何参考价值。

为了防止产生类似图 11 的不合理叶型,本文构建的优化系统设计了一套新的优化变量扰动机制.作为优化变量的控制点限定为沿叶型的法线方向移动,如图 12 所示,这样每个控制点用一个横坐标便可描述,可大大减少优化变量的数目.

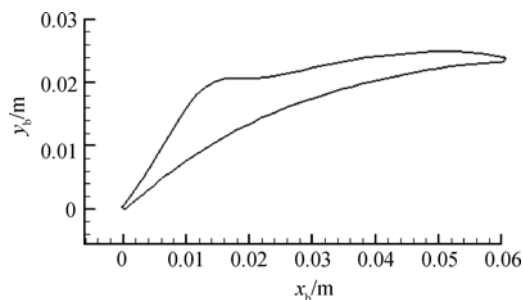


图 11 叶型控制点的不合理扰动导致产生畸变叶型
Fig. 11 Irrational disturbance to control points of airfoil results in the distortion airfoil

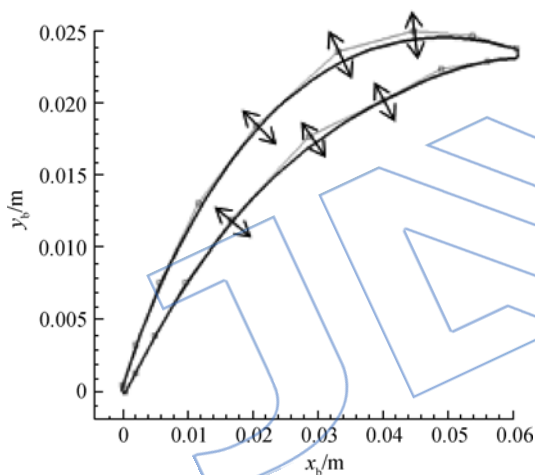


图 12 叶型控制点沿叶片表面法线方向移动
Fig. 12 Control points of airfoil move towards the norm direction along the blade

叶型控制点处型线法向曲率值从初始叶型中获取并且在优化过程中保持恒定,这样可以从一定程度上防止畸变叶型的产生.移动量的大小受法向曲率绝对值的影响,经反复实验发现式(9)确定的扰动量较为合理.

$$\Delta = \pm \mu \delta \bar{x} \frac{\sqrt{|k|}}{i+1} \quad (9)$$

式中 $\delta \bar{x}$ 为叶型数据点的平均横向间距, μ 为伸缩系数, k 为控制点法向斜率值, i 为从叶型前缘开始的控制点编号.

通过式(9),将每个控制点的移动量与其沿叶型的法向斜率联系起来,而不是传统地给每个控制点一个确定的移动量,这样可以有效避免畸变

叶型的产生.

3.3 计算结果与分析

本优化系统包括叶型拟合与参数化、叶型生成、优化算法和气动性能计算共 4 个模块.各模块之间的协作关系在图 13 中给出.

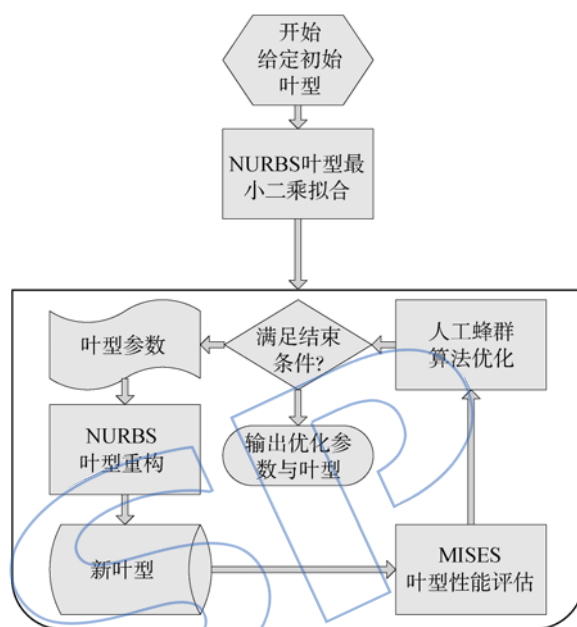


图 13 优化系统流程图

Fig. 13 Flow chart of the optimization system

如图 13 所示,该系统中各个模块相对独立,分别完成相应的功能,各模块由人工蜂群算法优化进行整合,算法优化程序自动调用参数化、NURBS 叶型重构和 MISES 性能评估等模块,各模块间通过生成临时文件共享数据,实现完全自动的优化设计.使用该优化系统对一内部实验叶栅进行了优化,优化的目标为最小化流动损失.控制点按式(9)进行扰动,抽吸槽位置在 40%~90%轴向弦长之间扰动,抽吸流量比在 0.1%~1.0%之间扰动.蜂群规模设为 40,进化 100 代,在一台配置 1G 内存, E5500 2.8 GHZ 双核 CPU 的计算机上历时约 3 h,优化过程的收敛曲线如图 14 所示.

图 15 给出了优化前后叶型的对比.从图中可以看出:从 50%轴向弦长以后,叶型吸力面型线开始逐渐向压力面偏移,厚度稍有减小,压力面型线有细微的变动但不甚明显.

优化得到最佳抽吸位置为 58.44%轴向弦长位置,在抽吸量达到设定的上限 1%时,流动损失最小,这是因为当叶型吸力面附面层较厚甚至出现分离时,抽吸量增大,可使动量厚度变薄,流动

损失减小^[2].

如图 16 所示,由于优化策略并未改变叶型前缘的几何形状,优化前后,叶型前缘表面马赫数分

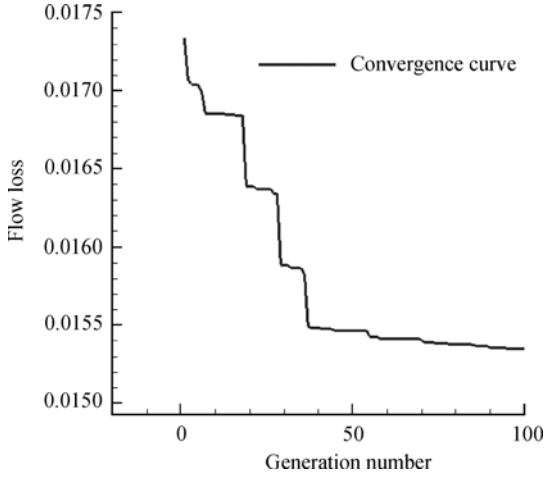


图 14 优化过程收敛曲线

Fig. 14 Convergence curve of the optimization process

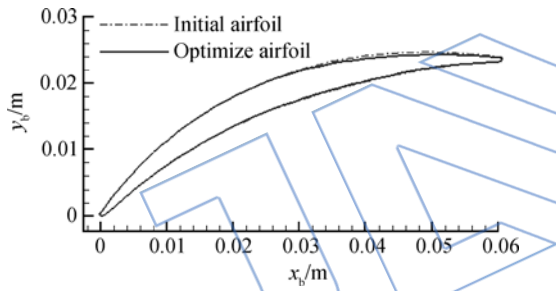


图 15 优化前后叶型对比

Fig. 15 Comparison of the airfoil before and after optimization

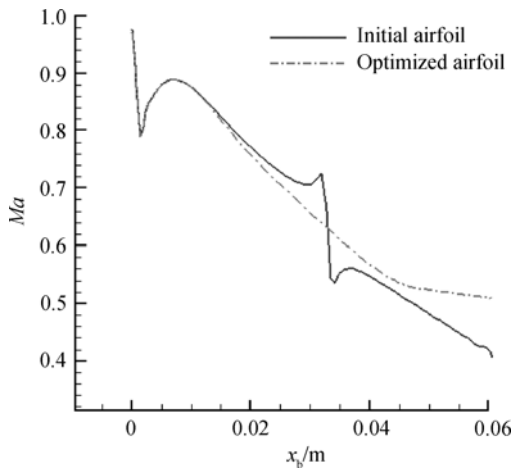


图 16 优化叶型与原始叶型表面马赫数分布

Fig. 16 Surface Mach number distribution of the airfoil before and after optimization

布一致,在 20%至 58.44%轴向弦长处,优化后叶型的表面马赫数明显较高且分布相对平缓,负荷相对较小.在抽吸位置之后,表面马赫数继续平稳下降,相反,优化前叶型的表面马赫数在后半段趋于平坦,预示附面层可能已经分离.

从吸力面附面层的形状因子分布图(图 17)中可以更加明显地看出,在优化前,吸力面附面层从 50%轴向弦长位置处开始急剧增厚随后产生分离(形状因子大于 3),优化后的吸附式叶型,在附面层发展的中期及时将其吸除,及时避免了气流的分离,从而使因分离产生的流动损失大大减小.

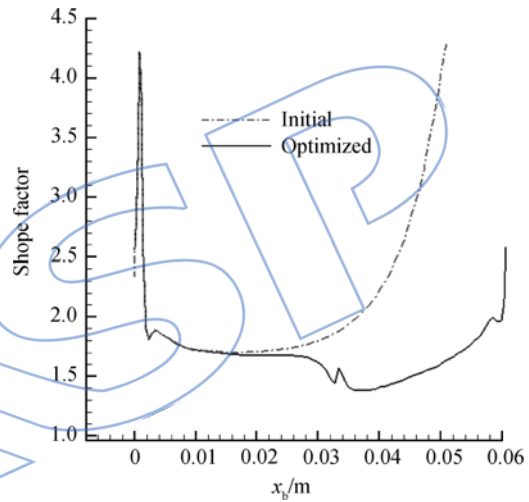


图 17 优化前后吸力面附面层形状因子分布

Fig. 17 Distribtuion of the shape factor of the suction side boundary layer between before and after optimization

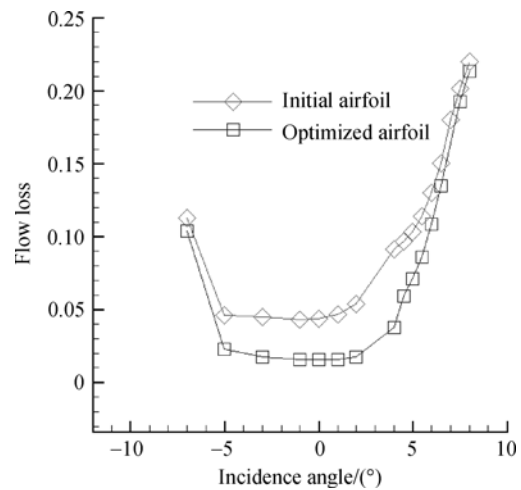


图 18 优化叶型与原始叶型的攻角特性

Fig. 18 Incidence angle charateristic of the airfoils before and after optimization

为了分析比较优化后叶型的攻角特性,本文计算了两种叶型从 -7.0° 到 $+8.0^\circ$ 共16个攻角下的流动损失情况,计算结果在图18中给出.从图中可以看出,在所选择的16个攻角中,优化叶型的流动损失均低于初始叶型,其中 -5° 到 $+5^\circ$ 攻角范围内流动损失的降低尤为明显.在大的负攻角和大的正攻角下,两种叶型的流动损失逐渐逼近.主要是因为在这种极端情况下,分离已不可避免且分离位置大大提前,而抽吸槽的位置相对靠后,即便采用更大的抽吸量也很难使附面层重新附着.而在大部分的正常攻角范围内,优化叶型仍具有明显的性能优势.

4 结 论

本文使用人工蜂群算法,结合NURBS参数化法与MISES求解程序,搭建了一套吸附式叶型优化设计系统,不同于以往的在现有叶型上直接优化抽吸位置的优化方法,经实验发现,优化效果良好,可得出如下结论:

1) 人工蜂群算法具有比遗传算法更加优秀的特性,更加适合复杂优化问题的求解.

2) NURBS参数化法能够实现叶型的局部修型,对于曲线的表达更为光滑和精确,且以较少的控制点便可实现复杂曲线的参数化,可有效减少优化变量个数,在叶型优化领域比传统的基于多项式的拟合更具优势.

3) 在叶型的优化设计过程中整合抽吸优化,在优化叶型的同时优化抽吸位置和抽吸量,充分发挥两者优势,实现最优化设计,可最大化地挖掘叶型潜能,对于提高叶型气动性能作用明显.

参考文献:

- [1] Kerrebrock J L, Reijen D P, Ziminsky W S, et al. Aspirated compressor[R]. ASME Paper 97-GT-525, 1997.
- [2] Merchant A. Aerodynamic design and performance of aspirated airfoils[R]. ASME Paper GT-2002-30369, 2002.
- [3] Carter C J, Guillot S. Aerodynamic performance of a high-turing compressor stator with flow control[R]. AIAA-2001-3973, 2001.
- [4] 宋彦萍, 陈浮, 赵桂杰, 等. 附面层吸除对大转角压气机叶栅气动性能影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 561-566.
SONG Yanping, CHEN Fu, ZHAO Guijie, et al. Numerical investigation of boundary layer suction in compressor cascade with large turning angles[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 561-566. (in Chinese)
- [5] 张华良, 谭春青, 张新敬, 等. 采用附面层抽吸(BLS)控制流动分离的数值模拟[J]. 推进技术, 2009, 30(2): 192-196.
ZHANG Hualiang, TAN Chunqing, ZHANG Xinjing, et al. Numerical investigation on application of boundary layer suction to control the flow separations[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(2): 192-196. (in Chinese)
- [6] 陈绍文, 郭爽, 陆华伟, 等. 超高负荷吸附式压气机叶栅气动性能分析[J]. 热能动力工程, 2009, 24(2): 167-171.
CHEN Shaowen, GUO Shuang, LU Huawei, et al. Analysis of the aerodynamic performance of a super-highly loaded adsorption type compressor cascade[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(2): 167-171. (in Chinese)
- [7] 陈绍文, 郭爽, 宋宇飞, 等. 附面层抽吸对高负荷压气机叶栅流场的影响[J]. 推进技术, 2009, 30(5): 588-593.
CHEN Shaowen, GUO Shuang, SONG Yufei, et al. Effects of boundary layer suction on the flow fields of highly-loaded compressor cascades[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(5): 588-593. (in Chinese)
- [8] Holland J H. Adaption in natural and artificial systems[M]. Massachusetts, US: The Massachusetts Institute of Technology Press, 1992.
- [9] Dorigao M, Stutzle T. Ant colony optimization[J]. Computational Intelligence Magazine, 2006, 1(4): 28-39.
- [10] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [11] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization [R]. Turkey: Erciyes University Technical, Report-TR06, 2005.
- [12] Karaboga D, Basturk B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 687-697.
- [13] Babayigit B, Ozdemir R. A modified artificial bee colony algorithm for numerical function optimization[C]// 2012 IEEE Symposium on Computers and Communication. Capadocia, Turkey: IEEE, 2012: 000245-000249.
- [14] Drela M. Two dimensional transonic aerodynamic design and analysis using the Euler equations[D]. Massachusetts, US: Massachusetts Institute of Technology, 1986.
- [15] Youngren H H. Analysis and design of transonic cascades with splitter vanes[D]. Massachusetts, US: Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [16] Merchant A A. Design and analysis of supercritical airfoils with boundary layer suction[D]. Massachusetts, US: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [17] Merchant A A. Design and analysis of axial aspirated compressor stages[D]. Massachusetts, US: Massachusetts Institute of Technology, 1999.