

文章编号: 1000-6893(2006)01-0029-04

# 混合遗传算法的研究及其在压气机叶型优化设计中的应用

金东海, 桂幸民

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

## Design Optimization of Compressor Blades by Hybrid Genetic Algorithm

JIN Dong-hai, GUI Xing-min

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and  
Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘 要:** 对混合遗传算法进行了初步研究, 并以此为基础建立了压气机叶型优化设计平台。在遗传算法中引入模拟退火算法, 增强了算法的局部寻优能力, 提高了运行效率和优化质量。为维护群体的多样性, 保证寻优的收敛, 选择概率和交叉概率的设计可以随个体适应度和进化阶段的不同而自适应变化。二维叶型定义采用的是 Bezier 函数参数化定义方法。该方法可以较好的拟合叶型曲面, 并通过少数控制点的调节灵活有效的修正叶型形面。对某压气机二维叶型的正问题数值优化结果表明本研究所建立的优化设计平台具有高效、可靠性好的特点。

**关键词:** 压气机; 混合遗传算法; 优化设计; 叶型; 模拟退火

中图分类号: V231.3 文献标识码: A

**Abstract:** A preliminary research is carried out in the genetic simulated annealing algorithm and a numerical optimization platform is developed based on the hybrid genetic algorithm. The introduction of simulated annealing into genetic algorithm notably improves the efficiency and capability of optimization. The adaptive crossover and mutation operators are devised to maintain the variety of population and to ensure the convergence of algorithm. Having few control points, but allowing flexible manipulation, the Bezier representation is chosen to describe the two dimensional compressor blade elements. The numerical optimization results show that the proposed numerical optimization platform works well with reasonable efficiency and robustness.

**Key words:** compressor; hybrid genetic algorithm; optimization; blade; simulated annealing

随着计算机技术的飞速发展和计算方法的日趋成熟, 数值优化在叶轮机械设计中发挥着越来越重要的作用。将优化算法与气动分析过程有机结合, 可以进一步缩短设计周期、降低设计费用。

传统遗传算法的全局搜索能力强, 简单通用, 鲁棒性、可靠性好, 适于并行处理, 在各种复杂系统问题的优化应用中都收到了良好的效果<sup>[1,2]</sup>, 但是它存在着诸如寻优时间长、局部搜索能力差等比较明显的缺点, 并不是适合所有的优化问题。梯度法、模拟退火法等一些优化算法具有较强的局部搜索能力, 如果将其与遗传算法融合应用, 优势互补, 将进一步提高算法的寻优效果。

基于金属退火原理而设计的模拟退火算法具有较强的局部搜索能力, 而且能够避免陷入局部最优解, 在近年的研究应用中得到了迅速的发展<sup>[3,4]</sup>, 但是其全局寻优能力较弱, 运行效率较低, 这些特点使其与遗传算法可以形成很好的互补, 具有形成性能更优良的全局寻优算法的基础。

本文在遗传算法中引入模拟退火的局部搜索, 形成混合遗传算法, 并将其应用于压气机二维叶型的气动优化设计。

## 1 优化方案

针对某一具体问题编制优化方案需要确定 3 个方面的内容, 即适宜的优化算法、所求问题的定义或描述以及目标函数的求解方法。本文中优化算法采用的是混合遗传算法, 叶型描述采用的是 Bezier 函数参数化表示方法, 流场计算应用的是二维黏性 CFD 程序。

### (1) 混合遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithms, 简称 GA) 是模拟生物在自然环境中的遗传选择和自然淘汰的进化过程而形成的一种全局优化概率搜索算法。20 世纪 70 年代, Holland<sup>[5]</sup> 奠定了遗传算法的基础。80 年代由 Goldberg<sup>[6]</sup> 归纳总结了遗传算法的主要研究成果, 系统论述了其基本原理, 形成了遗传算法的基础框架。遗传算法的优化机理为: 随机生成初始群体, 然后利用适者生存的选择操

作来产生性能优良的父代个体,再通过交叉和变异等操作来生成子代个体。如此循环,经过多代的繁衍进化,群体的适应性会逐步提高,直至得到具有最大适应值的个体。

本文针对遗传算法寻优过程长,局部搜索能力差的缺点,在变异遗传操作之后引入模拟退火算法的局部搜索<sup>[7]</sup>。变异产生的新个体由模拟退火算法中设定的接受概率来判断是否接受,如果该个体得到接受,则继续进行变异操作,如果被拒绝,则当前个体为新的子代个体。接受概率是由下面的 Metropolis 规则来确定:

$$p = \begin{cases} 1 & \text{if } E(x_{\text{new}}) < E(x_{\text{old}}) \\ \exp\left[-\frac{E(x_{\text{new}}) - E(x_{\text{old}})}{T}\right] & \text{if } E(x_{\text{new}}) \geq E(x_{\text{old}}) \end{cases}$$

其中:  $x_{\text{new}}$  为变异之后产生的新个体;  $x_{\text{old}}$  为变异前的父代个体;  $E(x_{\text{old}})$  为父代个体的适应度值;  $E(x_{\text{new}})$  为新个体的适应度值;  $T$  为模拟退火算法中当前状态下的温度。

变异算子的存在保证了群体的多样性和遗传算法一定的局部搜索能力。变异之后如果产生性能优良的新个体则延续变异操作,如此就实现了在新个体周围的局部搜索,提高了算法的局部寻优能力,提高了算法的优化质量。

小生境技术将寻优空间划分为若干个子域,在每一个子域中选出若干优良个体作为该域的代表,然后通过选择、交叉、变异等操作产生新一代的种群。小生境技术本身能够更好的维护种群的多样性,同时具有很高的收敛速度和全局搜索能力。

在算法中采用了 Goldberg 等提出的基于共享机制的小生境实现技术<sup>[7]</sup>。该方法的实现是通过反映个体之间相似程度的共享函数来重新调整个体的适应度值,然后由选择算子实现小生境的进化环境。本文优化对象是二维几何叶型,通过控制点几何坐标的调整来修正型面,所以共享函数定义为各个个体之间的几何距离。

本文将小生境技术与模拟退火局部寻优结合应用,在寻优空间划分为若干子域并选出各自代表个体之后引入上述模拟退火的局部搜索操作,形成分区的“多点爬山”,这样就可以更充分的发挥两者的优势,在提高算法的优化质量的同时提高优化效率。

遗传算法中的交叉概率  $p_c$  和变异概率  $p_m$  是最重要的两个运行参数。交叉和变异不仅反映着遗传算法模拟生物进化的本质根源,而且两者概率的选择直接影响着算法的寻优质量和运行效

率。本文中采用的交叉概率  $p_c$  和变异概率  $p_m$  的自适应技术就是为每一个个体提供最佳的概率参数。所谓自适应就是在寻优过程中交叉概率  $p_c$  和变异概率  $p_m$  可以随个体适应度的不同而自动变化。具体方法参见文献[7]。

## (2) 算法的性能测试

测试算法为标准遗传算法(SGA)、基于共享小生境技术的遗传算法(NGA)、混合遗传算法(HGA)和基于共享小生境技术的混合遗传算法(NHGA)。4种算法采用相同的运行参数,即群体大小 100、终止进化步数 100、交叉概率 0.9、变异概率 0.01。

测试函数 1 为求极小值的 Rosenbrock 函数:

$$f(x_1, x_2) = 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2$$

其中  $x_i \in [-2.048, 2.048]$ ,  $i = 1, 2$ 。该函数是单峰值的函数,在点(1, 1)处达到最优值 0。

优化结果如表 1 和图 1 所示。可以看出:标准遗传算法 SGA 的优化质量不高,所需寻优步数也较大,寻优过程很快停滞在一个较低的水平上;采用小生境技术之后的 NGA 优化精度得到了一定的提高,寻优步数得到了较大程度的减少,但是优化质量和收敛速度还是不够理想;混合遗传算法 HGA 的优化质量与 NGA 相比寻优精度有了显著的提高,但是迭代步数没有明显的变化;基于小生境技术的 NHGA 与 HGA 相比在进一步提高优化质量的同时,又大幅度地提高了算法的优化效率,显现出较强的优势。

表 1 4种算法的优化结果

Table 1 Optimal results of the four algorithms

算法	最优值	极值点	寻优步数
SGA	0.006 59	(0.9429, 0.8949)	79
NGA	0.002 35	(1.0470, 1.0951)	50
HGA	0.000 17	(0.9910, 0.9830)	53
NHGA	0.000 11	(1.0030, 1.0070)	16

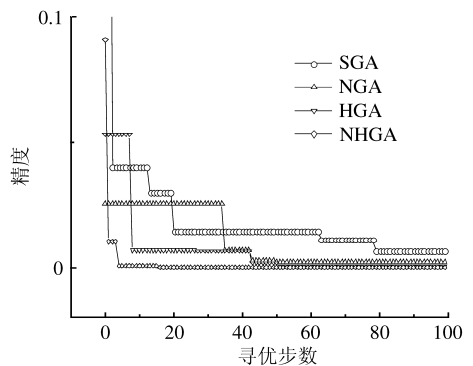


图 1 4种算法的进化曲线

Fig. 1 Evolutional history of the four algorithms

测试函数 2 为求极小值的 Shubert 函数

$$f(x_1, x_2) = \left\{ \sum_{i=1}^5 i \cdot \cos[(i+1)x_1 + i] \right\} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^5 i \cdot \cos[(i+1)x_2 + i] \right\}$$

其中  $x_k \in [10, 0, 10, 0], k = 1, 2$ 。该函数是多峰值的函数,在定义域内共有 760 个局部最小值,其中 18 个为全局最小值  $f = -186.731$ 。

优化结果如表 2 所示。可以看出:基于小生境技术的 NHGA 在多峰值函数的优化中在保证优化质量的同时仍然可以显现出较高的优化效率。

表 2 4 种算法的优化结果

Table 2 Optimal results of the four algorithms

算法	最优值	寻优步数
SGA	-186.6857	97
NGA	-186.7038	44
HGA	-186.7286	19
NHGA	-186.7286	15

气动优化设计所采用的优化算法是基于共享小生境技术的混合遗传算法(NHGA)。

### (3) 叶型定义

采用三次 Bezier 函数进行叶型的参数化定义<sup>[8]</sup>。通常 1 个  $n$  次 Bezier 函数表示为

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n p_i B_i^n(t) \quad 0 \leq t \leq 1$$

其中:  $Q(t)$  为曲线上任一点的坐标;  $p_i (0 \leq i \leq n)$  为曲线控制点的相应坐标值;  $B_i^n(t)$  为 Bernstein 多项式,其二项式形式为

$$B_i^n(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}$$

该方法所需控制参数少,操作灵活,叶型拟合精度较高,同时 Bezier 曲线具有保凸性,曲线上各点保持在控制点所描述的多边形之内,这些特点都有利于 Bezier 函数进行叶型定义。

利用 3 次 Bezier 函数描述一条曲线只需要 4 个控制点,其中 2 个是端点,另外 2 个控制端点的斜率。3 次 Bezier 函数可表示为

$$Q(t) = (1-t)^3 P_1 + 3t(1-t)^2 P_2 + 3t^2(1-t) P_3 + t^3 P_4$$

### (4) 气动分析方法

采用二维黏性 CFD 程序进行流场的数值模拟。计算网格是应用 Thomas 和 Middlecoff<sup>[9]</sup> (T-M) 方法求解泊松方程所得的 H 型网格,空间离散应用有限体积法,计算采用 Jameson<sup>[10]</sup> 提出的中心差分加二、四阶人工黏性的方法,时间

离散采用的显示三步龙格-库塔法。为加快收敛采取了多重网格、当地时间步长和隐式残差平均技术。

边界条件:进口给定总压、总温和绝对气流角,出口给定静压;固壁定义无穿透条件;周期性边界定义周期性条件。在优化过程中边界条件保持不变。

## 2 算例与结果分析

以某一压气机风扇转子叶根基元二维叶型为基准叶型进行优化设计。优化算法的运行参数设定为:群体大小 50、终止进化步数 40、交叉概率 0.9、变异概率 0.05。目标函数确定为损失系数,优化结果要使其达到最小。

二维叶型的前后小圆保持不变,吸力面和压力面分别由一条 Bezier 曲线拟合。每条 Bezier 曲线由 4 个控制点,其中首尾两个端点固定不变,中间两个控制点在临近端点的切线方向变化。为了考虑出口气流角对叶栅性能的影响,拓宽寻优空间,允许 Bezier 曲线末端的切线方向在  $\pm 5^\circ$  以内的范围变化。叶型定义的其它几何参数(安装角、叶型前尾缘半径、前缘几何构造角、稠度)在优化过程中保持不变。所以优化设计中实际选取了与吸压力面的几何表面以及尾缘几何构造角相关的 6 个设计变量。

气动优化计算寻找到最优值迭代了 21 步,优化效率还是较高的。图 2 给出了原始叶型和优化叶型的对比,由图可见优化叶型吸力面的最大挠度位置前移,叶型整体变薄。图 3 为原始叶型和优化叶型吸压力面马赫数分布图,从图中可以看出优化叶型表面流动更为平稳。表 3 统计了原始叶型和优化叶型的部分参数,其中优化的目标函数,即叶型的损失系数得到了一定的降低。

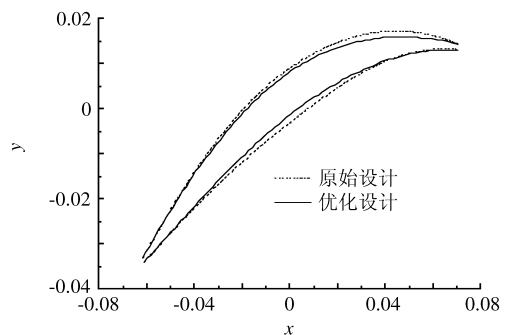


图 2 原始叶型与优化叶型的对比

Fig 2 Comparison of the optimized blade geometry with the original one

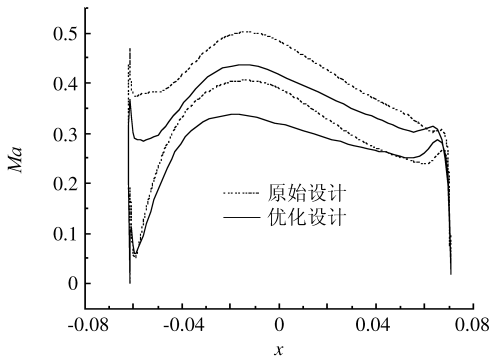


图3 原始叶型与优化叶型表面马赫数分布对比

Fig. 3 Comparison of the Mach number distribution on the optimized blade surface with that on the original one

表3 原始叶型与优化叶型的参数对比

Table 3 Comparison of some parameters of the optimized blade with these of the original one

参数	原始叶型	优化叶型
进口 Mach 数	0.40	0.39
出口 Mach 数	0.29	0.30
总压损失系数	0.040	0.038

### 3 结论

(1) 在遗传算法中引入模拟退火的局部搜索,并配合采用共享小生境技术和交叉、变异概率的自适应措施,有效地提高了算法的运行效率和优化质量。

(2) 混合遗传算法与 Bezier 函数参数化叶型定义法所构建的优化设计平台在叶型优化设计应用中表现出了高效、可靠的特点。

### 参 考 文 献

- [1] Jang M. Genetic algorithm based design of transonic airfoils using Euler equations[R]. AIAA 2000-1584, 2000.  
 [2] Terry L. Aerodynamic shape optimization using a real

number encoded genetic algorithm[R]. AIAA 2001-2473, 2001.

- [3] Besnard E. Design optimization with advanced simulated annealing[R]. AIAA 99-0186, 1999.  
 [4] Lee S L. Aerodynamic design of transonic airfoils using simulated annealing and Navier Stokes equations[R]. AIAA 2000-0782, 2000.  
 [5] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. MI: University of Michigan Press, 1975.  
 [6] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning[M]. Addison Wesley, 1989.  
 [7] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.  
 Wang X P, Cao L M. Genetic algorithms: theory, application and program. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. (in Chinese)  
 [8] Abdelhamid H F. Sweep in a transonic fan rotor, Part I: 3D geometry package[R]. ASME 98-GT-578, 1998.  
 [9] Thomas P D, Middlecoff J F. Direct control of the grid point distribution in meshes generated by elliptic equation [J]. AIAA Journal, 1979, 18(6): 652-656.  
 [10] Jameson A. Numerical solution of the Euler equations by finite volume methods using Runge Kutta time stepping schemes[R]. AIAA 81-1259, 1981.

作者简介:



金东海(1977-) 男(朝鲜族), 辽宁辽阳人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院流体机械系博士研究生, E-mail: buaajindonghai@163.com, 联系电话: 010-82316337。

桂幸民(1965-) 男, 上海人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院流体机械系教授, 主要从事高负荷跨音压气机流动机理, 气动设计技术与数值模拟, 实验测试技术方面研究。联系电话: 010-82317417。

(责任编辑: 刘振国)