

文章编号: 1000-8055(2007)02-0305-05

# 遗传算法在多级压气机气动 优化设计中的应用

脱 伟, 熊劲松, 侯安平, 周 盛

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 用遗传优化算法结合流线曲率法管流流场求解器建立了一种多级压气机多目标气动优化设计方法. 优化目标为总压比和绝热效率最大, 决策变量为转子和静子叶排尾缘速度环量. 测试结果表明, 该优化算法的搜索效率和全局性都较好. 用该方法对一台 5 级高压压气机进行了气动优化设计, 压气机性能有了明显提升.

**关 键 词:** 航空、航天推进系统; 多级压气机; 气动优化设计; 遗传算法; 多目标优化

**中图分类号:** V231. 3

**文献标识码:** A

## Application of genetic algorithm to multi-stage compressor aerodynamic optimization design

TUO Wei, XIONG Jin-song, HOU An-ping, ZHOU Sheng

(National Key Laboratory on Aero-engines,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A multi-objective aerodynamic optimization method is developed using genetic algorithm and duct-flow code that employs streamline curvature approach. Velocity circulations at the trailing edges of each blade-row are optimized for overall maximization of total pressure ratio and isentropic efficiency. The test indicates that the optimization algorithms can auto-search for optimal result globally and efficiently. A five-stage high pressure compressor is redesigned by using this method and the performance is enhanced greatly.

**Key words:** aerospace propulsion system; multi-stage compressor; aerodynamic optimization; genetic algorithm; multi-objective optimization

多级压气机气动设计是一项极具挑战性的工作. 一方面压气机设计本身涉及到的参数很多, 需要很多经验; 另一方面, 设计本身是个多目标问题, 要同时考虑一些相互可能有冲突的目标, 比如效率最大, 流量最大, 压比最高, 重量最小, 寿命最长等等, 设计者要根据设计需求和自己的经验在这些参数中取得一个“平衡点”.

计算机的出现和优化理论的发展, 大大减轻了设计者的负担, 也使压气机设计水平有了很大进步. 但是, 由于压气机内部流体控制方程 N-S 方程的高度非线性, 传统的优化算法用在多级压气机优化设计中都不是很有效, 往往只能在一个小范围内得到局部最优解. 遗传算法等一些仿生全局优化算法的出现, 才使该问题有了较好的解决.

收稿日期: 2005-12-23; 修订日期: 2006-03-09

基金项目: 国家自然科学基金支持项目(10477002)

作者简介: 脱伟(1982-), 男, 甘肃兰州人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 主要从事压气机非定常流动及气动设计研究.

本文利用遗传算法与压气机内部流场求解算法建立一种多级压气机气动优化设计方法. 为了使方法能满足工程设计快速高效的需求, 将优化仅限定在二维范畴内. 尽管这样, 涉及到的设计参数仍然很多. 因此, 抓住二维设计时的主要矛盾, 对问题做了进一步的简化: 优化的目标函数选取性能中最重要的两个参数——绝热效率和总压比, 对两者进行多目标优化, 而决策变量选取转子和静子叶排尾缘的速度环量.

## 1 多目标优化

多目标优化是指在满足给定约束条件下从设计变量的取值范围内搜索最佳设计点, 使多个设计目标决定的设计对象其整体性能达到最优. 但是在一般情况下, 不同目标对最优化的要求是相互冲突的, 不存在一个最优设计点使所有的目标同时达到最优, 一个目标性能的改善, 往往以其他一个或多个目标性能的降低为代价, 即绝对最优解一般不存在. 因此, 人们提出了有效解 (Pareto 最优解) 和弱有效解的概念.

多目标优化的求解方法大致可以分为两种: 直接算法和间接算法. 直接算法是直接对多目标优化问题求解, 而间接算法则是根据问题的实际背景和具体的容许性, 在各种意义下将多目标问题转化为单目标问题. 最常用的多目标优化的求解方法有: 评价函数法、交互规划法、分层求解法等. 本文就是用评价函数法中的线性加权和法, 将复杂的多目标优化问题转化为单目标问题, 并通过调节权重系数的大小得到了一系列原问题的有效解.

## 2 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm, 简称为 GA) 是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法<sup>[1]</sup>, 它能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识, 并自适应地控制搜索过程以求得最优解.

遗传算法采用种群的方式组织搜索, 这使得它可以同时搜索解空间的多个区域, 特别适合大规模并行. 简单的遗传操作和优胜劣汰的自然选择也使得遗传算法具有不受搜索空间限制性条件 (如可微、连续、单峰等) 及其它辅助信息 (如导数) 制约的特点<sup>[2]</sup>. 也正是这些特点, 将遗传算法用于优化产生了传统优化算法无法比拟的优越性, 在许多复杂问题的解决中都取得了巨大成功<sup>[3,4]</sup>.

本文将遗传算法同压气机内部流场求解器结合建立了一种多级压气机优化设计方法, 整个算法的流程图如图 1 所示.

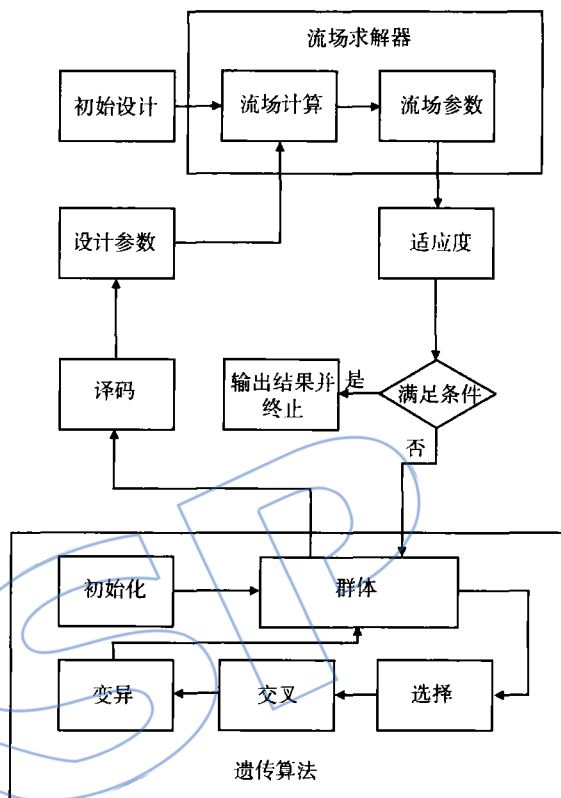


图 1 压气机气动优化设计流程图

Fig. 1 Compressor dynamic optimization flow chart

为了考察本文所用遗传算法程序的优化性能, 用一多峰值测试函数对其进行了测试. 测试函数如下:

$$\begin{cases} \max f(x) = x + 10\sin(5x) + 7\cos(4x) \\ \text{s. t. } x \in (0, 9) \end{cases} \quad (1)$$

初始群体数目取为 10, 最大遗传代数取为 25. 图 2 和图 3 为遗传算法测试结果, 其中图 2 为测试函数曲线图及遗传算法求解时群体演化过程, 图 3 为求解过程中群体适应度最大值和平均值的变化过程. 从图中可以看到虽然初始群体设置较少, 但是在进化 15 代之内就找到该测试函数的全局最优解, 因此该遗传算法的搜索效率和全局性都较好.

## 3 多级压气机气动优化设计方法

多级压气机气动设计大致都要经过一维、二维到三维设计这样一个流程, 在不同的设计阶段都可以用遗传算法跟相应的流场求解器搭建满足该阶段要求的优化算法. 与一维、三维阶段的优化相比, 二维阶段的优化具有信息全面, 用时较少的

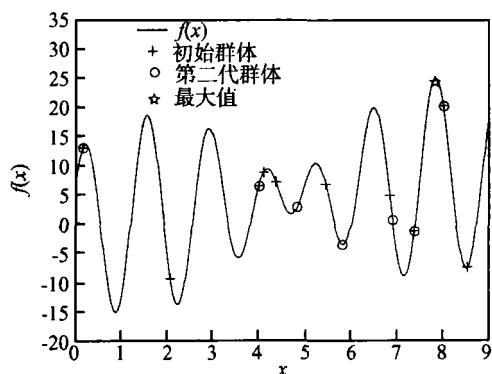


图2 遗传算法测试最终优化结果及群体演化过程

Fig. 2 Solution and population evolvement

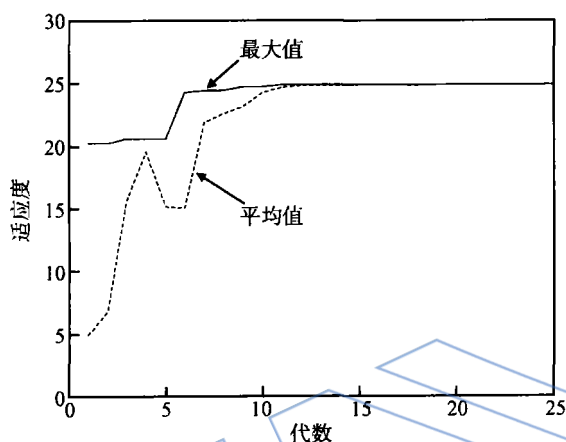


图3 遗传算法测试适应度变化轨迹

Fig. 3 Fitness evolvement

特点,因此显得尤为重要.本文就针对该阶段的优化进行探讨.

### 3.1 目标函数

该气动优化设计方法只考虑设计点性能的优化,而非设计点的性能则通过对优化结果的非设计点校核得到.性能参数只取绝热效率( $\eta^*$ )和总压比( $\pi^*$ ),目标函数为两者在多目标优化意义下的最大.

从设计参数到性能参数的流场求解过程采用二维流线曲率管流法.本文所采用的流线曲率管流/通流软件经过大量实践检验,具有求解速度快、误差小的特点<sup>[5]</sup>.在软件中用通过叶排的熵增来估计损失,即给定转子叶排的效率 and 静子叶排的总压恢复系数.

### 3.2 决策变量

在设计过程中需要确定的设计参数很多,对二维气动设计而言,最重要的是反映叶片加功量的速度环量( $CuR$ )在各叶片排中的分布,因此本优化算法的决策变量就取各叶排的速度环量分布,每

排径向方向均匀设置5个控制点,其余径向位置处的速度环量值由这5个点三次样条插值得到.

### 3.3 约束条件

对决策变量速度环量的搜索限定在原始设计值 $\pm 10\%$ 范围内.为了减少气流分离,要保证各叶排每个径向位置扩散因子( $D$ 因子)都不大于0.65.

这样就得到了多级压气机气动优化的数学模型:

$$\begin{cases} \max\{\pi^*(CuR), \eta^*(CuR)\} \\ \text{s. t. } |CuR - CuR_{ini}| < 0.1 |CuR_{ini}| \\ D(CuR) \leq 0.65 \end{cases} \quad (2)$$

采用常用的线性加权和法将多目标优化转化为单目标优化,可以通过调节权重系数得到不同的有效解.目标函数转化为:

$$f_{obj}(CuR) = \eta^*(CuR) * \frac{\omega}{\eta_{ini}^*} + \pi^*(CuR) * \frac{(1-\omega)}{\pi_{ini}^*} \quad (3)$$

其中, $\omega$ 为压比( $\pi^*$ )项的权重, $\eta_{ini}^*$ 为原始设计的效率, $\pi_{ini}^*$ 为原始设计的压比,用原始设计的效率和压比将目标函数中的效率压比无量纲化处理之后,原始设计的目标函数 $f_{obj}(CuR) = 1$ ,对于性能改善的优化结果则 $f_{obj}(CuR) > 1$ .

对于约束的处理,本文则是通过引入罚函数将约束优化问题转化为带惩罚的无约束优化问题,对违背约束的个体进行惩罚,使其适应值大大降低并通过选择机制将其淘汰.在遗传过程的初始阶段,希望优化过程收集到设计变量取值范围内尽可能多的全局性信息,所以对违背约束条件的设计点施加较小的惩罚;而当遗传过程接近结束时,又希望以较高效率得到尽可能精细的设计结果,保证设计结果落在设计变量所允许的取值范围内,所以对违背约束的设计点施加很大的惩罚<sup>[3]</sup>.因此,为了适时地调节惩罚量的大小,采用动态惩罚函数,取一个单调增的罚因子序列.

决策变量 $CuR$ 的直接约束在遗传算法中很容易实现. $D$ 因子的约束通过罚函数加到适应度函数中,本文针对 $D$ 因子约束构造的罚函数为:

$$f_{pen}(CuR, t) = \sigma_t \{ \min[0, 0.65 - \max(D(CuR))] \}^2 \quad (4)$$

其中, $\sigma$ 为控制初始罚因子的常数, $t$ 为当前的进化代数.

这样,多级压气机气动优化设计数学模型(2)最终转化为:

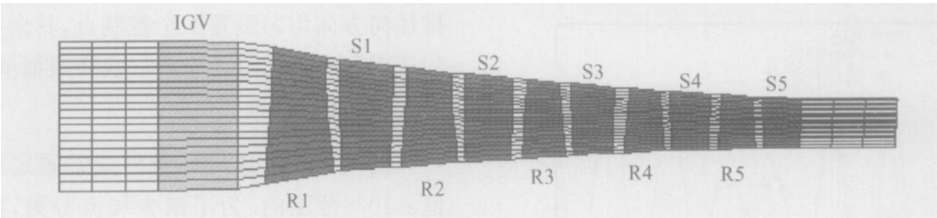


图 4 5 级压气机原始设计

Fig. 4 Original design of five-stage compressor

$$\left\{ \begin{array}{l} \max 1 / \left[ \eta^* (CuR) * \frac{\omega}{\eta_{ini}^*} + \pi^* (CuR) * \frac{(1 - \omega)}{\pi_{ini}^*} \right] + \alpha [\min(0, 0.65 - \max(D(CuR))) ]^2 \\ s. t. \quad | CuR - CuR_{ini} | < 0.1 \quad | CuR_{ini} | \end{array} \right\} \quad (5)$$

4 5 级高压压气机气动优化设计

为了验证该方法的可行性及有效性,本文对一台 5 级高压压气机初步气动方案进行了二维气动优化设计.图 4 为待气动优化处理的 5 级高压压气机原型图.该 5 级高压压气机初始设计值为总压比  $\pi^* = 6.194$ ,绝热效率  $\eta^* = 0.8217$ ,即式 (5) 中的  $\pi_{ini}^* = 6.194$ , $\eta_{ini}^* = 0.8217$ .

采用上文介绍的多级压气机气动优化设计方法对该 5 级高压压气机进行二维气动优化设计,决策变量为 11 个叶排尾缘的速度环量沿径向分布,每排 5 点,共 55 点.每个决策变量的初始化群体数目取为 80,最大进化代数取为 25 代,二维管流程序求解压气机内部流场的网格见图 4 所示.取不同的权重系数得到了不同的优化结果.

优化结果见图 5、图 6 所示,其中图 5 为优化结果与原始设计性能参数的对比,可以看到经过优化该压气机性能有了明显的改善,图 6 为优化结果的绝热效率  $\eta^*$  和总压比  $\pi^*$  随权重不同的变化规律.优化过程中群体演化过程见图 7 所示(以  $\omega = 0.5$ ,第二个叶片排叶中位置的  $CuR$  变化规律为例),群体适应度最大值及平均值轨迹见图 8 所示.

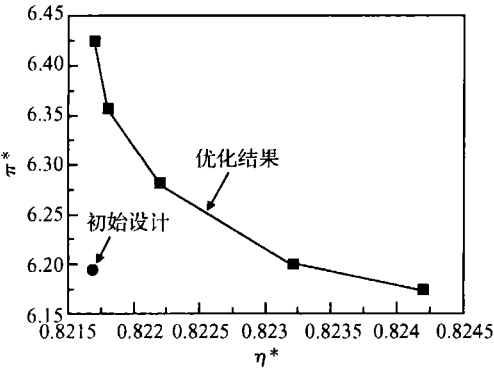


图 5 5 级高压压气机气动优化设计前后性能对比  
Fig. 5 Performances before and after optimization

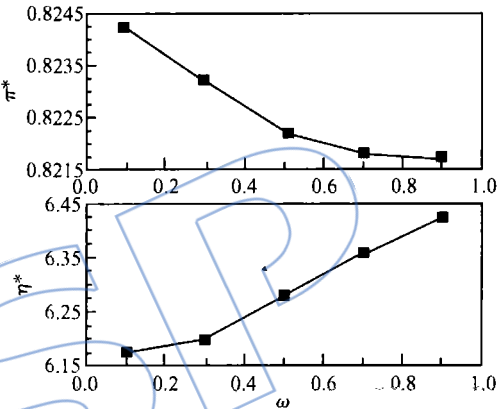


图 6 优化结果压比效率与权重的对应关系  
Fig. 6 Total pressure ratios and isentropic efficiencies at different powers

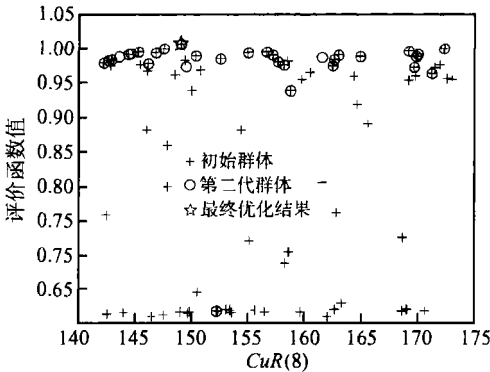


图 7 8 级高压压气机气动优化群体演化过程  
Fig. 7 Population evolution

5 级高压压气机气动优化设计结果分析表明:

- (1) 通过调整权重系数得到了一系列有效解,目标函数压比( $\pi^*$ )和效率( $\eta^*$ )都有一定的提高,达到了优化的目的.至于最终选取哪个点做优化后的设计点,要根据具体设计要求来决定.
- (2) 从图中可以看到优化对压比改善效果明显,效率提高幅度不大,这与算法中所采用的损失模型有关.决策变量随着优化过程的进行不断改变,但是效率损失模型所决定的损失并未因此

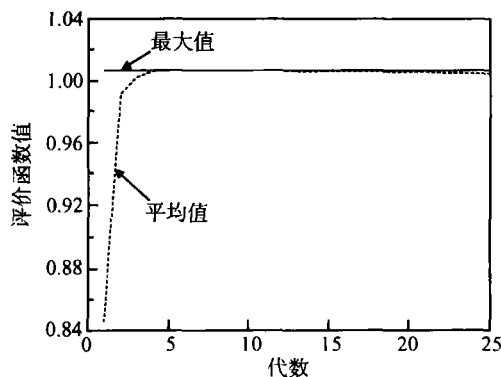


图8 5级高压压气机气动优化群体适应度轨迹

Fig.8 Fitness evolution

而改变,反映在最终结果上就是效率变化不是很明显。

## 5 结论与展望

将基因遗传算法应用于多级压气机的初步设计,结合流线曲率管流流场求解器,导出了多级压气机的全局多目标最优化设计方法。使用该方法对一台5级高压压气机设计方案进行优化,结果表明,通过对各个叶片排尾缘速度环量的优化,压气机总压比与绝热效率均得到了提升。同时研究工作表明,该算法对于设计具有全局寻优的优势,

同时也保证了短时快捷的特点。

该方法的不足在于:

(1) 流线曲率管流法中的损失模型还有待完善;

(2) 在算法中仅考虑了设计点的性能参数,对非设计点性能考虑不足。

最后要指出的是,优化过程受制于物理模型本身。要实现大幅度地提高压气机的性能,必须具备对压气机内部流动机理的深刻认识。

## 参考文献:

- [1] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [2] 王晓鹏. 遗传算法及其在气动优化设计中的应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2000.
- [3] 吉根林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件,2004, 21(4):69-73.  
JI Genlin. Survey on genetic algorithm[J]. Computer Applications and Software. 2004, 21(4): 69-73.
- [4] Oyama A. Multiobjective optimization of a multi-compressor using evolutionary algorithm[R]. AIAA 2002-3535, 2002.
- [5] GUI X M, ZHOU S. A transonic compressor design methodology including the influence of 3D passage chock waves [R]. ASME Paper 99-GT-78, International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Indianapolis, 1999.