基于 Pareto 遗传算法的复合材料机翼优化设计

程文渊 崔德刚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100083)

摘 要：针对某型飞机设计过程中遇到的副翼反效问题，提出了复合材料机翼满足气动弹性要求的优化方法，构造了一种基于 Pareto 最优解定义的多目标遗传算法——Pareto 遗传算法. 该算法以权重信息为基础建立 Pareto 解集过滤器，引入小生境技术等实现 Pareto 前沿面的求解. 测试函数计算表明该算法有较好的收敛性. 以复合材料机翼的升力系数和滚转力矩系数为目标函数，采用 Pareto 遗传算法进行计算得出一组 Pareto 最优解集，计算结果表明，给出的方案能够满足工程需求，为决策者提供了多种可选方案.

关 键 词：Pareto 最优解；遗传算法；多目标优化

中图分类号：V 214.8

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)02-0145-04

Optimization for composite wing based on Pareto genetic algorithm

Cheng Wenyuan Cui Degang

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the aileron reversal problem in aircraft design, an aero-elastic tailoring optimization model of composite wing for engineering requirement was established and the Pareto genetic algorithm (PGA) based on Pareto optimal set was developed. In order to obtain the Pareto optimal set, the Pareto filtering pool was constructed based on weight information in PGA. And the niche technology was utilized to keep the diversity of population. The computation of the test function indicates that PGA has good convergence. In the numerical example, setting the lifting coefficient and the rolling moment coefficient as objective functions, the expected Pareto optimal set was obtained by using PGA. The results show that the Pareto optimal set satisfies the engineering requirement and can provide many feasible projects for the decision-maker to choose.

Key words: Pareto optimal sets; genetic algorithm; multi-objective optimization

大展弦比布局已成为高空飞行飞机的重要布局形式，具有升阻比高的优点，但也遇到了气动弹性问题的挑战. 主要表现在 3 个方面：操纵面反效、机翼发散和颤振. 而副翼反效则是操纵面反效中的典型问题. 利用复合材料的气动弹性剪裁设计可以改善飞机气动弹性性能，从而起到克服副翼反效的作用. 但这种优化设计方法设计目标、设计变量、约束众多，且这些目标、约束往往是无法相互比较甚至相互矛盾的，难以同时进行优化.

传统的解决方法往往通过线性加权系数法、极大极小法等将多目标优化问题转化为单目标优化问题，而这种方法往往需要根据决策者的偏好度不同，多次修改权重反复进行优化才能得到满意的方案. 近年来，基于 Pareto 最优解的遗传算法在解决多目标优化问题方面也逐渐出现，这种优化方法一般将多个目标值直接映射到适应度函数中，通过比较目标值的占优关系来搜索问题的有效解集. 这种方法一次运行可以求出多个有效解，但是算法复杂，运算量大，求解目标比较多和种群规模大时效率很低[1-5].

本文提出一种改进的多目标优化方法——Pareto 遗传算法，用于解决当前飞机设计中面临

收稿日期：2006-03-13

作者简介：程文渊(1980—)，男，河南南阳人，博士生，iace_chwy@163.com.

的副翼反效的问题,计算求得一组可供决策者选择的满意解.

1 复合材料机翼多目标优化问题

复合材料大展弦比机翼飞机在设计过程中面临着副翼反效问题,主要表现在由副翼偏转引起的升力系数 ΔC_z 为负值和由副翼偏转引起的滚转力矩系数 ΔC_{mx} 偏低.本研究采用非对称非均衡铺层的气动弹性剪裁设计技术,利用弯扭耦合效应来改变机翼的气动弹性特性,从而实现升力系数由负转正且有效改善滚转力矩系数.非对称非均衡铺层的产生通过在原有机翼对称层合板上增加铺层获得.为了实现在增加最少重量的情况下使得 ΔC_z 由负值变为正值和 ΔC_{mx} 提高最多,对复合材料翼面铺层进行优化计算,在不同的位置,添加不同角度、厚度的铺层,每次增加的总厚度为1%的蒙皮重量,逐次进行添加,直至达到设计要求.

2 Pareto 最优解定义

多目标优化问题的最优解与单目标优化问题有着本质的区别,有必要对其最优解[1,4]的概念进行定义.多目标优化问题可以描述为

$$\left.\begin{aligned}&\min F(x)=[f_1(x),f_2(x),\cdots,f_m(x)],m\geqslant 2\\&\text{s.t.}\quad x\in D\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中,$f_i(x),i=1,2,\cdots,m$ 为各个子目标函数;D 为模型约束集.

定义 1 设 $x_1\in D,x_2\in D$,当且仅当式(2)成立,称 x_1 比 x_2 优越.

$$\begin{aligned}&\forall i\in(1,2,\cdots,m),f_i(x_1)\leqslant f_i(x_2)\ \wedge\\&\exists j\in(1,2,\cdots,m),f_j(x_1)<f_j(x_2)\end{aligned}\tag{2}$$

定义 2 若 $x^*\in D$,且在 D 中不存在比 x^* 更优越的解,则称 x^* 为 Pareto 最优解,又称非劣解.由所有 Pareto 最优解构成的子空间称为 Pareto 前沿面.

3 Pareto 多目标遗传算法

3.1 PGA(Pareto Genetic Algorithm)算法特点

1) 模糊归一化处理.

采用模糊归一化[1]方法处理适应度值:

$$\left.\begin{aligned}&F_j(x_i)=(f_j(x_i)-\overline{f}_j)/(f_j{}^0-\overline{f}_j)\\&i=1,2,\cdots,p;\quad j=1,2,\cdots,m\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

式中,$F_j(x_i)$ 为第 i 个个体 x_i 相对于第 j 个子目标函数 f_j 的适应度值;$\overline{f}_j$ 和 $f_j{}^0$ 分别为相对于第 j 个子目标函数 f_j 的理想值和初始值;p 为种群数.

2) Pareto 解集过滤器.

首先确定所求非劣解的个数(记为 n),然后构造一组包含 n 组权重比值的数据反映所有非劣解搜索方向,再根据这组权重比值计算出种群中各个个体 x_i 的 n 个适应度值.第 i 个个体 x_i 的满足第 k 个非劣解要求的适应度值可以表示为

$$\left.\begin{aligned}&F^k(x_i)=\sum_{j=1}^{m}w_j^kF_j(x_i)\\&i=1,2,\cdots,p;k=1,2,\cdots,n\\&\sum_{j=1}^{m}w_j^k=1\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

式中,w_j^k 为在求解第 k 个非劣解时第 j 个子目标函数 f_j 对个体适应度的影响程度.对 n 个搜索方向下的所有个体进行排序,找出各个方向下的最优和最差个体,将之放入 Pareto 解集过滤器中.

3) 精英保存策略.

区别于标准单目标遗传算法最优保存策略中将每一代个体中单个最优个体遗传到下一代的方式,Pareto 遗传算法中用 Pareto 过滤解集中的 n 个 Pareto 最优个体代替相应搜索方向下的 n 个 Pareto 最差个体,实现精英保存策略,从而保证在 n 个适应度下都能沿着收敛方向搜索.

4) 小生境技术.

小生境技术[4]根据共享函数来调整种群中各个个体的适应度,以维护种群的多样性,创造出小生境进化环境,经过共享函数处理后的个体适应度可表示为

$$\left.\begin{aligned}&f'(x_i)=f(x_i)\Big/\sum_{j=1}^{p}S(d_{ij})\\&S(d_{ij})=\begin{cases}1-\dfrac{d_{ij}}{R_{\text{share}}} & d_{ij}\leqslant R_{\text{share}}\\0 & d_{ij}>R_{\text{share}}\end{cases}\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

式中,R_{share} 是 niche 半径,它是较好峰值之间个体的最小距离;d_{ij} 是个体 x_i 和 x_j 之间的海明距离.

5) Pareto 直接竞争选择算子.

从群体中任取 2 个个体 x_1 和 x_2 直接比较各自的各个适应度值:如果个体 x_1 的 2 个适应度值都比个体 x_2 的相应的 2 个适应度值优越,则个体 x_1 被选中且遗传到下一代;反之,如果个体 x_1 的 2 个适应度值都没有个体 x_2 优越,则个体 x_2 被选中且遗传到下一代;否则随机选取一个遗传到下一代.反复执行上述过程,直至个体数目达到 p[6].PGA 流程图如图 1 所示.

3.2 PGA 与其它算法计算结果比较

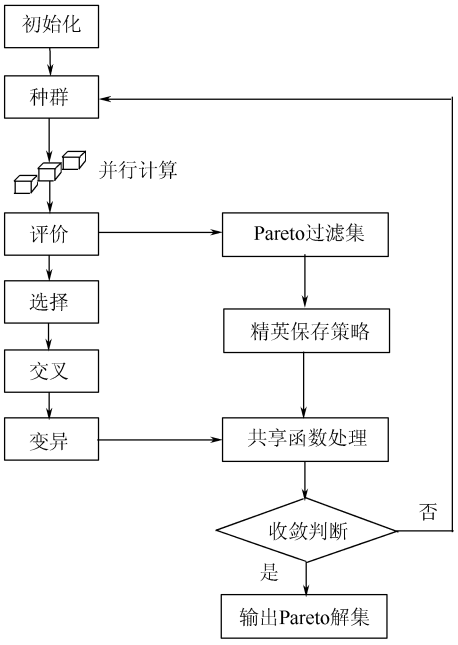


图 1　PGA 流程图

$$\left.\begin{aligned}&\min\begin{bmatrix}f_1(x)\\f_2(x)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}2\sqrt{x_1}\\x_1(1-x_2)+5\end{bmatrix}\\&\text{s.t.}\quad x_1\in[1,4],x_2\in[1,2]\end{aligned}\right\}\qquad(6)$$

采用公式(6)的测试函数[7]进行仿真实验,初始参数为:$p=200$;交叉概率 $P_c=0.9$;变异概率 $P_m=0.01$;$n=20$;最大进化代数为 200. Pareto 最优解的个数 n 可以进行调节,当 n 较小时,同时搜索的方向较少,每代运算的时间较短,得到 Pareto 最优解也较少,形成的 Pareto 前沿面不够精确;当 n 较大时,同时搜索的方向较多,得到较多的 Pareto 最优解,能够形成较好的 Pareto 前沿面,耗时也相应增大,但利用基于网格平台的并行遗传算法就可以有效地提高计算效率. 运行 10 次,得到较典型的一次运行结果如图 2 所示. 较文献[7]中 MGA(Multi-objective Genetic Algorithm)算法能更好地覆盖 Pareto 前沿面.

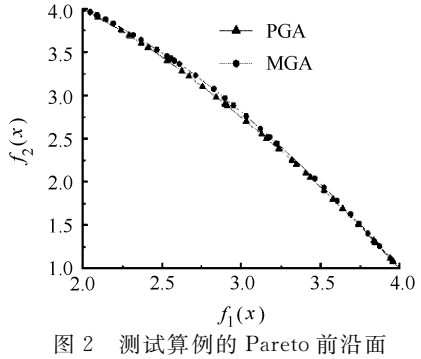


图 2　测试算例的 Pareto 前沿面

4　机翼结构多目标优化计算

4.1　机翼结构优化问题数学描述

本文中以复合材料机翼副翼反效问题为研究对象,选择复合材料的铺层角度,铺层厚度和铺层位置作为设计变量. 目标性能涉及 2 个方面,一方面考虑改善 ΔC_z,使之由负变正;另一方面考虑提高 ΔC_{mx}. 优化问题数学描述为

$$\left.\begin{aligned}&\max\begin{bmatrix}f_1(x)\\f_2(x)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Delta C_z\\\Delta C_{mx}\end{bmatrix}\\&\text{s.t.}\quad x=\{(x_1,x_2)\mid x_1\in[1,345],\\&\qquad x_2\in[-90,90]\}\\&\qquad\Delta t_i=n\cdot t_{\text{layer}}\qquad n=0,1,\cdots\\&\qquad\Delta t_i\geqslant t_{\min}\qquad i=1,2,\cdots,x_1\end{aligned}\right\}\qquad(7)$$

式中,x_1,x_2 分别表示蒙皮铺层添加块数、添加角度;Δt_i 是第 i 个单元上添加铺层厚度;t_{layer} 为层合板的单层厚度;$t_{\min}$ 为单元上的最小厚度.

4.2　优化参数设置及过程

根据上述算法,采用自编的 Pareto 遗传算法程序对上述数学模型(式(7))进行求解. 初始参数设置如下:$p=200$,$P_c=0.9$,$P_m=0.05$,最大进化代数为 30,迭代次数为 60,$n=9$. 确定 n 个非劣解搜索方向的权重比值可以从表 1 中得出. 根据式(3)~式(4)可以计算出各个搜索方向下的适应度值,根据图 1 中所示流程进行优化. 本算例中,每次迭代是一个优化过程,可以得出由 n 个非劣解组成的 Pareto 前沿面. 优化过程中可以根据各个解的贡献,决策选定权重. 如早期选择 ΔC_z 权重较大,当后期权重对提高 ΔC_z 作用比较小时,则选择权重比值接近于 1,此权重对 2 个目标函数贡献都较大. 各个搜索方向下的非劣解的选定仍然按照各自的搜索方向下对应的权重比值而定.

表 1　权重比值

参数	方案								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w_1	100	10	5	3	2	1	1	1	1
w_2	1	1	1	1	1	1	2	5	10

4.3　优化结果及分析

经过 60 次迭代,完成本次优化计算. 图 3~图 4 给出了 2 种不同角度考虑下的 Pareto 前沿面. 图 4 是在添加 60%的蒙皮复合材料重量后各种方案下的 ΔC_z,ΔC_{mx} 的关系图.

初始状态下的 $\Delta C_z=-0.092\,56$,$\Delta C_{mx}=0.486\,33$. 图 3 给出了多种设计方案,只考虑改善 ΔC_z 的情况下,增加 33%的蒙皮重量就可以实现 ΔC_z 由负转正,此时 ΔC_{mx} 提高 10%;只考虑提高 ΔC_{mx} 的情况下,增加 53%的蒙皮重量,ΔC_{mx} 提高 16.3%,此时 ΔC_z 由负转正. 从图 4 中可以看出,

在增加60%的蒙皮重量后，各种方案下 ΔC_z 和 ΔC_{mx} 随着添加蒙皮重量的百分比的增加都呈上升趋势，只是由于偏好度的不同而使得各种方案下 ΔC_z 和 ΔC_{mx} 增加的幅度互有高低，但都能够实现 ΔC_z 由负值变为正值和 ΔC_{mx} 有所改善的预期目标，为决策者提供了多种可选方案. 图5给出了Pareto解集中 $w_1 : w_2 = 1 : 2$ 情况下的蒙皮厚度变化云纹图.

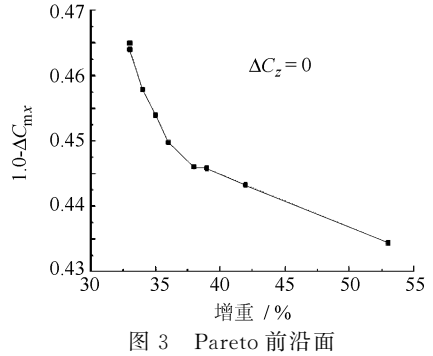


图3 Pareto前沿面

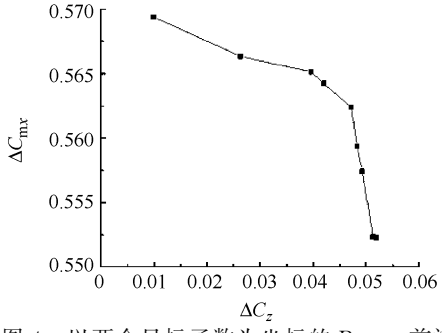
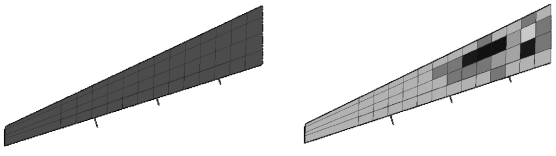


图4 以两个目标函数为坐标的Pareto前沿面



a 优化前 b 优化后

图5 机翼蒙皮厚度云纹图

5 结束语

针对多目标优化问题提出一种基于Pareto最优解和权重信息的多目标遗传算法，用测试算例验证了该算法具有良好的收敛性能，并将之应用于复合材料机翼结构满足气动弹性要求的优化设计中. 从Pareto遗传算法的搜索结果可以看出，求得的Pareto最优解集合具有较好的分散性，能够为决策者提供多种设计方案，达到了预期的目标. 采用Pareto遗传算法，不但可以解决复合材料机翼副翼反效的问题，还可推广到其他的复合材料多目标优化问题中去.

参考文献（References）

[1] 徐玖平，李军. 多目标决策的理论与方法[M]. 北京：清华大学出版社，2005
Xu Jiuping, Li Jun. Multiple objective decision making theory and methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005(in Chinese)

[2] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182－197

[3] Zitzler E, Thiele L. Multi-objective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257－271

[4] 隋洪涛，陈红全，黄明恪. Pareto基因算法多目标翼型优化设计[J]. 航空学报，2002，23(2)：177－179
Sui Hongtao, Chen Hongquan, Huang Mingke. Multi-objective airfoil optimization using Pareto genetic algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 177－179(in Chinese)

[5] 杨青，邱菀华，汪亮. 固体火箭发动机成本与性能双目标优化设计[J]. 北京航空航天大学学报，2005，31(5)：574－577
Yang Qing, Qiu Wanhua, Wang Liang. Dual-objective optimization design for cost and performance of a solid rocket motor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(5): 574－577(in Chinese)

[6] Crossley W A. Genetic algorithm approaches for multiobjective design of rotor systems[R]. AIAA-96-4025-CP, 1996

[7] Murata T, Ishibuchi H, Tanaka H. Multi-objective genetic algorithm and its applications to flowshop scheduling [J]. Computers and Industrial Engineering, 1996, 30(4): 957－968

（责任编辑：张 嵘）