

改进的多目标遗传算法在
无人机机翼结构优化中的应用
苟仲秋, 宋笔锋, 李为吉

(西北工业大学航空学院, 陕西西安 710072)

摘要: 现有的多目标遗传算法往往只能求得整个非劣曲线的一部分, 同时局部搜索能力差, 收敛速度较慢。为了解决这些问题, 提出了一种改进算法, 该算法将非劣分层遗传算法(NSGA)与向量评估遗传算法(VEGA)的优点结合起来, 并且提供了一个利用往代信息构造搜索方向的局部搜索算子, 有效扩展了非劣曲线的范围, 加快了收敛速度。以某无人机机翼结构的多目标优化问题为例, 证明本文改进算法可以较为快速地获得一个分布均匀的非劣解集。

关键词: 多目标优化; 遗传算法; 结构优化

中图分类号: V214.19 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2006)03-0007-03

在进行结构设计时, 设计者总是希望结构重量能够最轻, 同时结构受载后的变形又尽可能的小。这两个相互矛盾的指标在设计时必须进行权衡处理, 构成了一个典型的多目标优化问题。如果能求得该问题的非劣解集, 决策者就能对两个指标间的关系有完整的认识, 从而能更好的决策和折衷。

多目标遗传算法是近年来兴起的处理多目标优化问题的有效工具, 它采用基于群体的搜索策略, 可以在一次运行过程中生成大量的非劣解, 非常适合处理多目标优化问题。然而现有的多目标遗传算法往往只能求得整个非劣曲线的一部分, 同时由于局部搜索能力差, 收敛速度较慢。为了解决这些问题, 本文对非劣分层遗传算法(NSGA)^[1]进行了改进。以某大型无人机机翼结构的多目标优化为例进行验证计算, 结果表明, 采用该算法可以较为快速地获得一个分布均匀的非劣解集, 从而为设计者的决策提供充分的依据。

1 算法

在多目标遗传算法中, 非劣分层遗传算法是一种概念明确的基于 Pareto 最优概念的优秀算法, 在许多领域都有了成功的运用^[2]。该方法依 Pareto 关系对种群进行分层, 然后再依据分层计算个体的适应度。这种基于非劣关系的选择策略使得非劣分层遗传算法易于得到各目标的折衷解, 但对单目标极值解的发现能力较弱, 导致解集往往不能覆盖整个非劣最优域。另一方面, 基于单目标并列选择策略的向量评估遗传算法尽管对折衷解的发现能力较弱, 却容易求得个别子目标函数的极端最优解, 解集往往分布在非劣最优域的端点。因此将这两种选择策略结合起来, 有可能获得更好的解集分布。

目前增强遗传算法局部搜索能力普遍采用确定性搜索的策略, 包括采用基于梯度的算法、摄动等。这些方法在确定搜索方向时往往需要多次评估个体即要多次调用分析程序, 很大程度上冲淡了改进效果, 同时基于梯度的策略还使遗传算法丧失了不依赖导数信息的优点。事实上, 为了减少调用分析程序的次数同时不依赖导数信息, 可以利用上一代群体提供的信息, 寻找一些近似改进方向, 进行确定性搜索加快收敛速度。

基于上述想法, 提出了下面的计算方法, 具体步骤如下: ①初始参数输入, 产生初始群体; ②解码, 计算目标和约束; ③采用 Y. Cheng 等人的提出的模糊处理策略^[3]对约束进行模糊处理; ④按比例划分群体, 分别按

收稿日期: 2005-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10377015)

作者简介: 苟仲秋(1980-), 河南孟州人, 男, 博士生, 主要从事飞行器的设计优化研究。

VEGA 和 NSGA 中的选择策略进行选择,其中 NSGA 在目标空间共享适应度;⑤合并成为新群体;⑥普通交叉操作和变异;⑦以给定概率进行局部搜索,对新群体中的个体,限定某个设计变量邻域,在上二代群体中随机选择各目标有所改进的个体(若在邻域内无改进个体,则不进行局部搜索),用二者设计变量的差分为搜索方向,正则化后进行局部搜索,搜索步长取定值;⑧收集解集,保存群体;⑨达到预定迭代次数则停止计算,否则转②。

2 某无人机机翼结构优化模型

2.1 机翼结构布局

某无人机机翼展长 11.665 m,根弦长 1.372 m,尖弦长 0.494 m,翼根相对厚度 18%,翼尖相对厚度 14%。该机翼翼展较长,同时结构高度绝对值又比较小,在结构布局上选用厚蒙皮双梁式,桁条较弱。2 根梁布置在结构高度较大处,在根弦的相对位置分别为 34%,67%。最大肋间距约为 700 mm,共布置 28 根肋。在选材上蒙皮采用碳纤维/环氧树脂复合材料(T300/QY8911)^[4],0°、±45°、90°铺层各占 25%,梁缘条的材料为钢(30CrMnSiA),梁腹板、肋及桁条选用铝合金(LY12)。

在有限元模型^[5]中,蒙皮采用 4 节点等参元,梁简化为受剪板和正应力杆。整个模型共 560 节点,计有复合材料 4 节点等参元 540 个,各向同性材料 4 节点等参元 386 个,三角元 56 个,杆元 1 156 个。

2.2 无人机机翼结构优化模型

1) 设计目标:结构重量最轻,机翼最大 Y 向位移最小。

2) 设计变量:由于桁条较弱,肋腹板比较薄,因此选择蒙皮与梁腹板的厚度作设计变量优化潜力较大。鉴于翼肋将蒙皮及梁腹板分为 27 段,这里选择各段蒙皮与梁腹板厚度作设计变量,共 54 个设计变量。

3) 约束条件:在初步设计阶段只考虑应力约束,要求 4 种单元的最大应力小于设计许用应力。由以上分析建立优化数学模型为: $\min W = W(T), L_{\max} = L(T), s. t. \sigma_i \leq \sigma_{\text{allowable}}$,即 $R_i \geq 1, i = 1, 2, 3, 4$ 。其中 $R_i = \sigma_{\text{allowable}} / \sigma_i$ 为各类单元的最大应力比, W 为结构重量, L_{\max} 为机翼的最大 Y 向位移, T 为设计向量。

该大展长机翼受到气动载荷后变形将较大,这不仅有可能改变机翼的气动特性,更重要的是给飞控系统带来很大困难,然而控制结构变形必须付出重量代价。由于对此类大展弦比机翼设计经验较少,总体设计人员迫切地希望能得到机翼重量与位移间的大致关系,这就要求得到多目标优化的非劣解集。本文提出的改进算法与同类算法相比,计算效率更高,获得的解集范围更大,因此可望以较小的代价解决上述设计困难。

3 优化结果及分析

算法的主要运行参数取为:种群规模 80,最大进化代数 150,交叉概率 0.8,变异概率 0.003,所有设计变量均采用 8 位编码。改进算法中种群分割比例为 1:3(VEGA 占 1/4),局部搜索概率取 0.2。图 1、图 2、图 3 分别是 2 种算法在 50、100、150 代的演化结果。

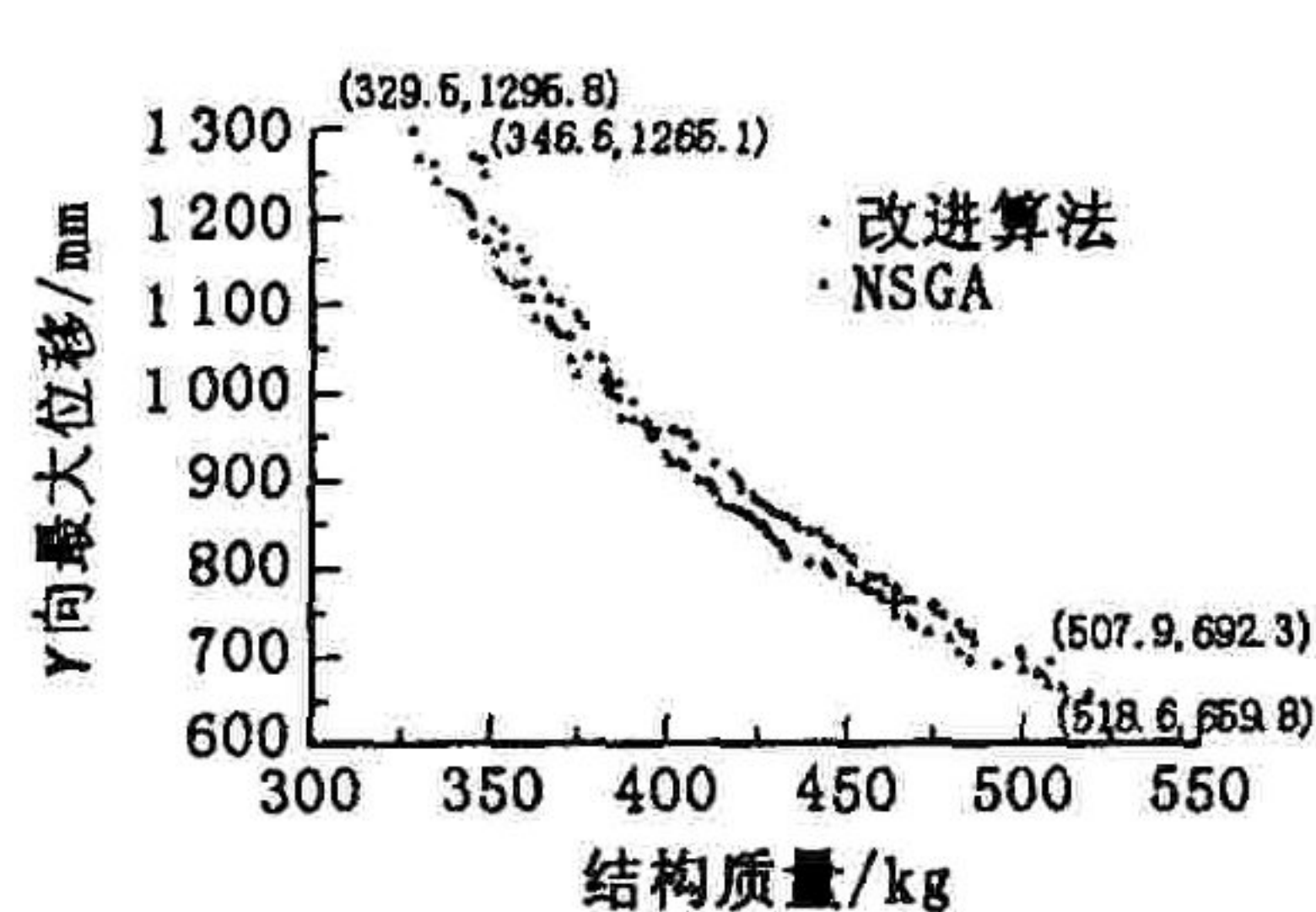


图 1 50 代演化结果

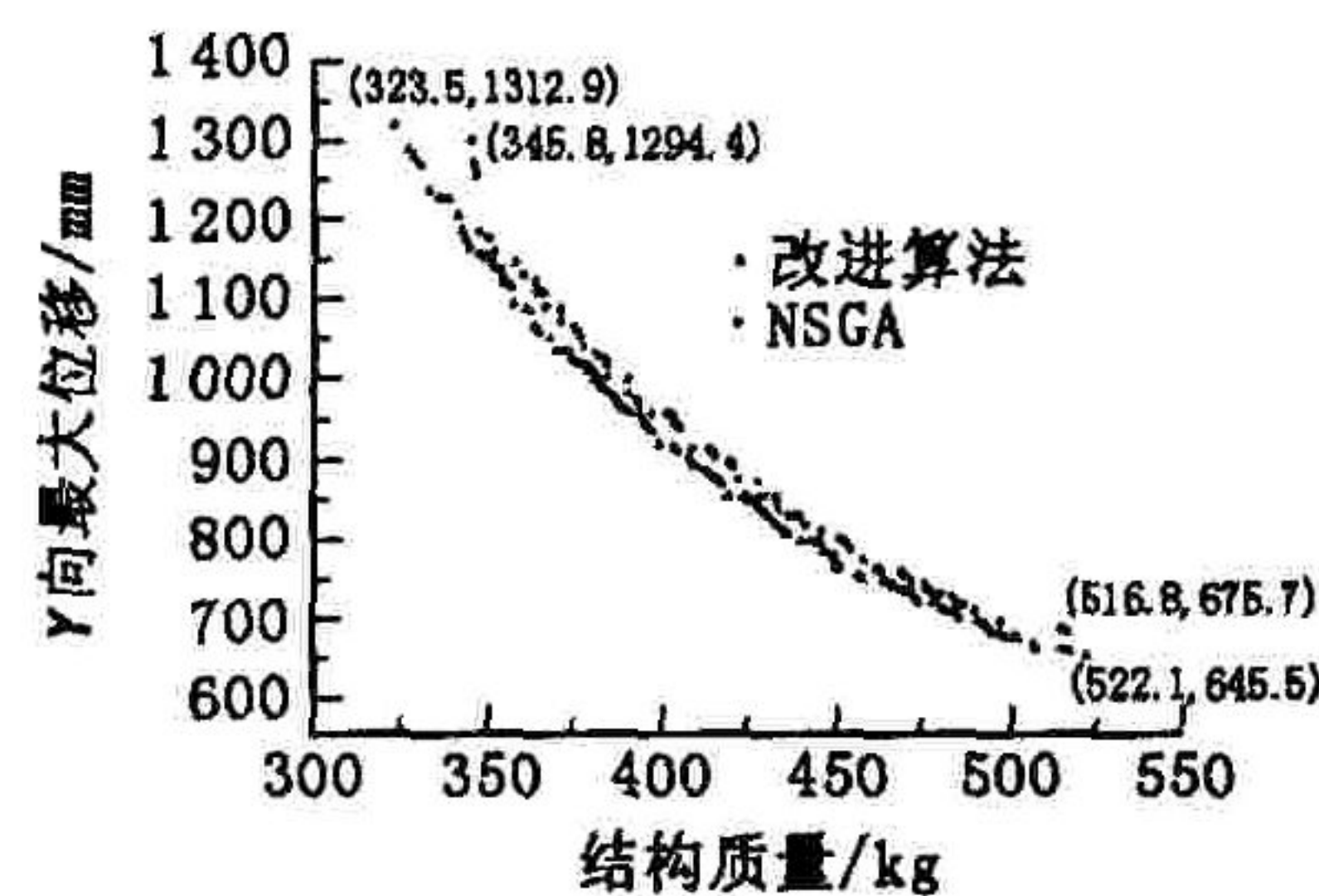


图 2 100 代演化结果

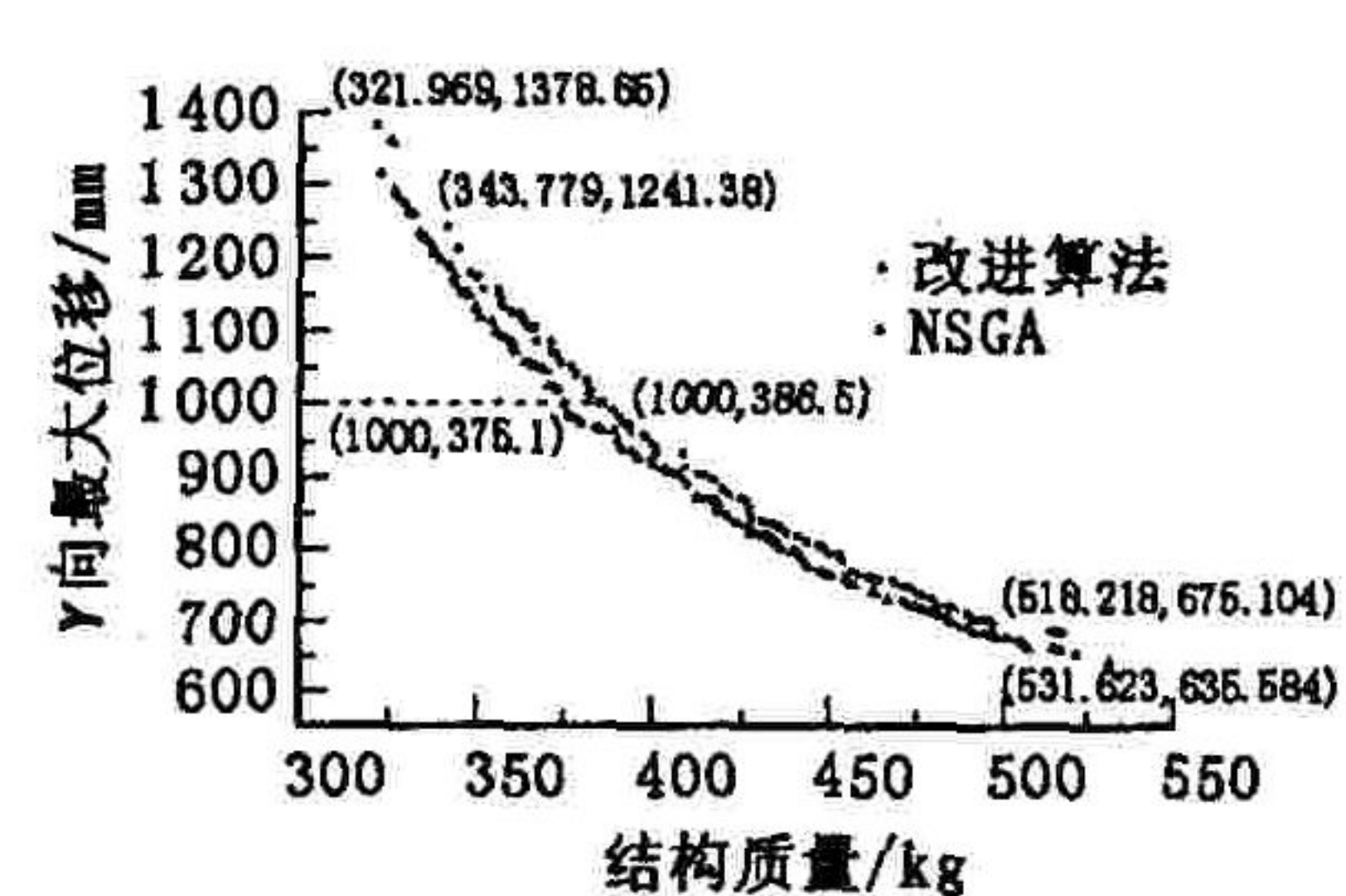


图 3 150 代演化结果

由图可以看出:

1) 在演化相同代数后,一方面由于 VEGA 的作用,解集的扩展范围增加了,在图中体现为蓝线(三角图标)的包络范围要大于红线(圆点图标);另一方面改进后的算法总是能找到更接近非劣最优域的解集,在图中体现为蓝线总是比红线更接近左下方,因此得到同等效果的解,改进后的算法所需的演化代数要少,达到

了加速收敛目的。

2) 遗传算法在初始阶段解的改进速度较快,随着代数的增加改进速度越来越慢,因此图中尽管红线距蓝线不远,却需要较多代数才能演化得到。如在150代时,NSGA找到的最小重量为343.779 kg,这比改进算法在100代甚至在50代的值还要大,也就是说改进算法只需演化50代就可达到NSGA演化150代的效果。在图3中可以更清楚的看到,当允许最大Y向位移为1 000 mm时,改进算法得到结构重量可比NSGA减轻11.4 kg,这一结果是令人满意的。

3) 对本例获得了质量从321.969 kg到531.523 kg的大量非劣解,为决策者决策提供了充分信息。例如从结果中可以发现将最大位移从750 mm降低到635 mm将付出约115 kg的质量代价,决策者可以利用这一信息来决定是否有必要放宽位移限制。这些也充分体现了多目标遗传算法在解决实际工程问题的优势。

4 结论

1) 本文对非劣分层遗传算法进行了改进,将其与向量评估遗传算法结合起来,并增加了一个利用往代群体信息的局部搜索算子,不仅扩展了解集的范围,也大大加快了收敛速度。算法在无人机机翼结构优化中的应用表明所提出的改进算法是有效的,对多目标优化问题具有普遍意义。

2) 改进算法在计算位移、重量等状态变量时采用的是精确模型,这限制了计算速度的进一步提高,诸如响应面等近似模型的应用有可能使算法获得更高的计算效率。

参考文献:

- [1] Srinivas N, Kalyanmoy Deb. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms[J]. *Evolutionary Computation*, 1994, 2(3): 221 - 248.
- [2] Carlos A, Coello Coello. An Updated Survey of Evolutionary Multiobjective Optimization Techniques: State of the Art and Future Trends[J]. *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, 1999, (1): 3 - 13.
- [3] Cheng Y. Multiobjective Optimization Design with Pareto Genetic Algorithm[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(9): 1252 - 1261.
- [4] 杨乃宾,章怡宁. 复合材料飞机结构设计[M]. 北京:航空工业出版社,2002.
- [5] 姜晋庆,张 铎. 结构弹塑性有限元分析法[M]. 北京:宇航出版社,1990.

(编辑:姚树峰)

An Updated Multi-objective Genetic Algorithm and Its Application to

Unmanned Aircraft Wing Structural Optimization

GU Zhong-qiu, SONG Bi-feng, LI Wei-ji

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: Current multi-objective genetic algorithms usually can only attain part of the whole pareto front, at the same time, because of the worse local searching ability, the convergence speed is slow. In order to overcome these disadvantages, an updated multi-objective genetic algorithm is proposed in this paper. The updated algorithm not only Integrates the merits of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) and the Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA), but also has a local searching operator which constructs the searching direction by using the previous population's information, so it can effectively expand the scope of non-inferior solutions and improve the convergence speed. Using the updated algorithm, this paper succeeds in optimizing a large unmanned aircraft wing structure. The result indicates that the new algorithm can rapidly acquire uniform non-inferior solutions and prove the superiority of the algorithm.

Key words : multi-objective optimization ; genetic algorithm ; structure optimization