

文章编号: 1000-3851(2007)01-0167-05

基于分布式计算的复合材料机翼优化设计

程文渊¹, 常艳², 崔德刚^{*1}, 谢向辉²

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京100083; 2. 江南计算技术研究所, 无锡214083)

摘要: 将遗传算法与高精度的通用有限元分析软件相结合, 并将其应用于复合材料机翼满足气动弹性要求的优化设计中。为了提高采用遗传算法的复合材料机翼优化设计的效率, 探讨了将分布式计算与遗传算法进行集成, 形成了基于分布式计算和遗传算法的复合材料机翼优化设计方法, 并应用该方法解决某大展弦比复合材料机翼副翼和舵面操纵反效问题。计算结果表明, 该方法可用于解决工程上复杂结构优化问题。

关键词: 多目标优化; 复合材料; 分布式计算; 遗传算法

中图分类号: V214.8; TP393 **文献标识码:** A

Composite wing optimization design based on distributed computing

CHENG Wenyuan¹, CHANG Yan², CUI Degang^{*1}, XIE Xianghui²

(1. School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Jiangnan Institute of Computing Technology, Wuxi 214083, China)

Abstract: The high accuracy commercial FEA (finite element analysis) software was integrated with GA (genetic algorithm) to solve the composite wing optimization design for aeroelastic request. An optimization algorithm for composite wings was proposed that integrates the distributed computing with GA to enhance the efficiency. Taking the aileron and control surface reversal problem of a high-aspect-ratio composite wing as an example, the result shows that the algorithm can solve the complicated structure optimization problem in engineering.

Keywords: multi-objective optimization; composite material; distributed computing; genetic algorithm

遗传算法(GA)在函数优化中所具有的良好特性使其在复合材料机翼气动弹性剪裁设计等连续/离散设计变量的结构优化领域中显示出极好的应用前景。但在处理工程上遇到的复杂结构拓扑优化问题时, 往往很难保证优化的精度和效率^[1-5]。

分布式计算是近年来提出的一种新的计算方式。所谓分布式计算就是在两个或多个软件互相共享信息, 这些软件既可以在同一台计算机上运行, 也可以通过网络在多台计算机上运行。共享稀有资源和平衡负载是计算机分布式计算的核心思想之一。经过近20多年来的研究, 分布式操作系统的理论、技术已经较为成熟, 但离实际应用还有一定的距离。目前国内外均致力于分布式计算的实际应用, 根据863计划国内近年来也已经在气象、医药、航空等方面进行了研究。分布式计算在工程优化问题应用方面, 尤其是在解决以有限元分析为主要手

段的复杂结构优化问题时, 有限元求解部分多以解析法为主, 这为实际应用及工程推广带来了困难^[6-13]。

本文将通用有限元分析软件作为目标函数的求解器与遗传算法进行集成, 形成用于解决以高精度结构有限元分析为基础的优化算法。并将基于P2P模式开发的网格平台进行集成, 建立起一套多目标复合材料结构优化系统, 既发挥了有限元分析软件强大的有限元求解能力, 又发挥了遗传算法的良好全局优化性能, 同时利用分布式计算提高了计算效率。并针对某复合材料机翼副翼和舵面操纵反效问题, 进行优化设计, 在可接受的计算时间内得到了满足工程要求的解。

1 问题提出

某大展弦比复合材料机翼在设计过程中面临着

副翼与舵面操纵反效的问题，主要表现在升力系数对升降舵偏角的导数 C_z 为负值和滚转力矩系数对副翼偏角的导数 C_{mx} 偏低。

1.1 主要思路

本研究中利用非对称非均衡层合板的弯扭耦合效应来改善机翼的气动弹性特性，从而使升力系数导数 C_z 由负值转为正值，并且保证原有的滚转力矩系数导数 C_{mx} 也有所提高。为了在增加最少铺层的情况下实现该目标，对复合材料铺层进行优化计算，在不同的位置，添加不同角度、厚度的铺层。在计算中，每次增加的铺层总厚度为1 % 的蒙皮重量，逐次进行添加，直至达到设计要求。

1.2 优化问题的数学描述

根据高精度的有限元模型，对副翼和舵面效率进行优化，可以用以下数学模型来表达：

$$\begin{aligned} \max : F(x) &= [f_1(x), f_2(x)] \\ \text{s.t.} \quad & x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \\ & t = n t_{\text{layer}} \end{aligned} \tag{1}$$

式中： $f_1(x)$ 为目标函数 C_z ， $f_2(x)$ 为目标函数 C_{mx} ；设计变量 x_1 表示蒙皮铺层的添加角度， x_2 表示蒙皮铺层的添加块数。设计空间为

$$-90^\circ \leq x_1 \leq 90^\circ, 0 \leq x_2 \leq 112 \tag{2}$$

t 为添加厚度， t_{layer} 为单层板的厚度。

从制造工艺角度考虑，在一般情况下，复合材料铺层的厚度和纤维的铺设方向角可以选择某一范围内的连续值，但是纤维层的厚度则只能选择有限个规格中的特定值。因此，式(1) 是一个离散变量和连续变量混合的多目标优化问题。

1.3 多目标优化问题的处理

当不考虑上述2 个目标函数的重要性等级序列时，可用下式构造等价的优化设计目标：

$$g(f_i) = \sum_{i=1}^2 \frac{f_i(x) - f_i^{\min}(x)}{f_i^{\max}(x) - f_i^{\min}(x)} \tag{3}$$

式中： f_i 、 f_i^{\max} 、 f_i^{\min} 分别为第*i* 个设计目标的待求值、最大值和最小值。当评估函数 $g(f_i)$ 在满足约束条件情况下取得最优解时，认为式(1) 中设计目标取得了在整体意义上的非劣解。

2 遗传算法的构建

构造上述等价优化模型的遗传算法主要考虑以下几个方面：适应度值的选取；染色体的编码；群体规模；选择、交叉、变异等遗传算子的设计等。

2.1 适应度值的定义

由式(3) 给出的评估函数始终为正，且使评估函数值越大的解均为较优的设计解。评估函数的这个特性完全符合遗传算法中适应度值的定义，因此可以直接将评估函数值作为所求问题的适应度值。并采用动态比例变换法，使得在整个遗传算法搜索过程中适应度值能够更准确地反映种群中个体的信息，避免早熟。

2.2 编码规则

采用二进制格雷码编码方式对上述问题进行染色体构造，如图1 所示。图中前7 个字节表示添加块数，可行域为[1,112] 之间的整数，通过对该字段转换成十进制并取整求得；中间 n 个字节组成的字段表示添加角度，根据可行域 $[\min, \max]$ 以及求解精度 可以确定添加角度的编码长度

$$n = \text{int} \log_2 \frac{\max - \min}{\text{精度}} + 1 + 1 \tag{4}$$

单层板的厚度的可行域为[0.05,0.5]，根据式(4) 同样可得单层厚度的编码长度。

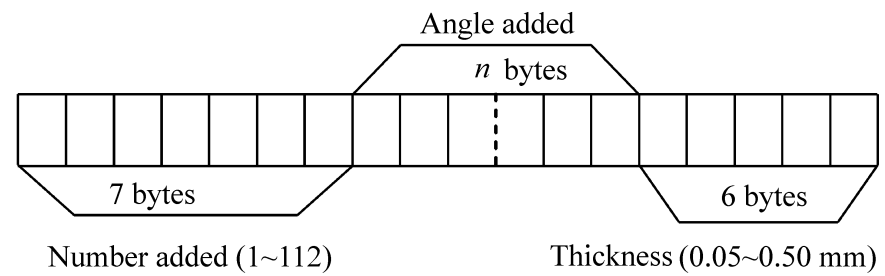


图1 染色体编码
Fig.1 Coding of the chromosome

2.3 遗传算子的设计

选择算子采用常规的比例选择算子，交叉、变异算子采用改进的多变量多点交叉、变异算子，2 个染色体各个设计变量内部进行单点或者双点交叉。染色体长度超过7 则用双点交叉、变异，否则选择单点交叉、变异。

为了克服遗传算法搜索变量空间巨大的问题，同时还引入了1 个排序算子。优化问题实际上是对添加铺层位置、添加铺层厚度和添加铺层角度的优化，若在现有2 个设计变量的基础上再将添加铺层位置作为1 个变量，则搜索空间会变得很大，因为铺层位置的范围在0 ~112 之间，若每次的最佳铺层块数是30，则铺层位置的变量为30 个，添加50 种不同的角度，则铺层位置的变量就为30 ×50，变量大，则需要初始群体很大，遗传代数也要增加到很大才能使所有变量达到最佳值。因此增加1 个排

序算子, 对112 块铺层位置进行排序, 则每次添加1 种角度的铺层后, 就对112 块复合材料蒙皮进行排序, 如果最佳铺层块数是30, 则在排序后的前30 块位置上添加这种角度的铺层。

3 基于分布式计算的遗传算法

3.1 网格技术

相对于一些传统的优化算法, 遗传算法优化设计存在着计算量较大的问题, 尤其是对于计算量原本就相当大的复杂结构气动弹性问题。而遗传算法的内在并行性特点决定了它特别适宜于大规模并行计算, 从而为网格技术与遗传算法进行集成解决大规模计算问题提供了天然条件。

网格技术是分布式计算的一个新发展, 它可使用户更好地共享因特网范围内的各种计算资源。计算网格是国际上近年来大力推动的一种网络高性能计算模式。目标是在广域网上建立大规模计算和数据处理的基础支撑结构, 将分散在各个计算中心的高性能计算能力通过高速网络连成网格, 形成前所未有的超级网络分布计算能力, 透明地为用户提供服务。P2P 模式(Peer-to-peer), 即对等模式, 是一种已经被广泛采用的网络计算形式, 可以利用所有联网计算机的空闲处理器周期, 聚合计算能力, 集中一些需要大规模计算的问题, 有效地将通过网络互联的PC 机组织起来, 构成桌面网格。分布式计算是P2P 成功运用的领域之一, 最适合利用整个网络上可得的CPU 时来完成诸如计算机模拟和分析等计算密集型的任务。

3.2 算法的整体思路

本文中以P2P 计算为基础, 结合网格思想, 利用分布的计算机资源, 采用多目标遗传算法, 实现有效的、高可用的并行计算。将遗传算法优化过程分解成几个子过程: 产生初始种群, 适应度计算, 遗传算子。通过网格服务器上的流程管理软件将该过程重新仿真, 将其中最耗时的适应度值计算步骤的计算任务并行化, 把个体的适应度评价过程封装成多个大小适中的独立的任务单元, 通过调度软件分配到参与计算的所有节点, 实现各节点并行处理计算任务。适应度值计算完成后自动将结果反馈给服务器, 并根据子节点的申请要求和服务器上数据库中信息重新分发新的计算任务。

根据该算法, 将多目标遗传算法同江南计算所研发的网格技术平台进行集成开发出基于网格技术

的多目标飞机优化系统(Multi-objective optimization grid, MOOG)。并搭建了一套并行网格系统, 由5 台(intel Pentium 4 CPU 3.0 MHz, Memory 1024 MB) 的电脑组成。该系统的使用及管理是Client/Server(C/S) 结构, 其界面采用了Web 方式。Web 服务器选用Apache, Web 服务器端主要采用PHP 语言, 它是一种HTML 内嵌式的语言, 可以比CGI 或者Perl 更快速地执行动态网页。任务管理用的数据库采用MySQL, MySQL 是一个强壮、快速、多线程、多用户的SQL 数据库管理系统, 支持标准的ANSI SQL 语句。

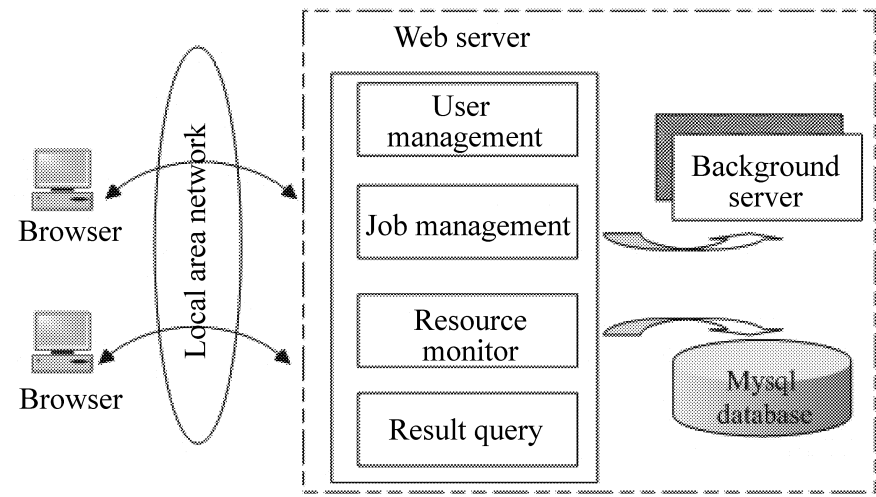


图2 多目标优化系统管理实现结构图

Fig.2 Management structure of MOOG

该系统有如下特点: (1) 该系统采用有限元分析软件作为目标函数的求解器, 既能够保证工程上可用, 又能够保证优化结果的高精度, 满足工程需求; (2) 基于分布式的资源进行遗传算法优化, 提高了计算速度, 保证了优化效率; (3) 建立了基于Web 的网格优化系统, 可以实现本地/异地提交计算任务和实现任务管理; (4) 通过界面将优化过程动态实时显示, 输出形式主要为曲线、图片。

4 算例分析

某大展弦比复合材料机翼在设计过程中, 初始状态下 $C_z = -0.05924$, $C_{mx} = 0.50123$ 。要求在增重不超过蒙皮复合材料20%的情况下实现 C_z 转为正值, 且使 C_{mx} 提高不低于10%。计算时, 通过用户页面进行任务提交, 初始运行参数为: 种群数为200, 任务单元容量为10, 变异概率为0.05, 交叉概率为0.8, 最大代数数为30, 迭代次数为20, 初始代数为0, 初始迭代次数为1。初始状态下机翼蒙皮厚度图如图3 所示。

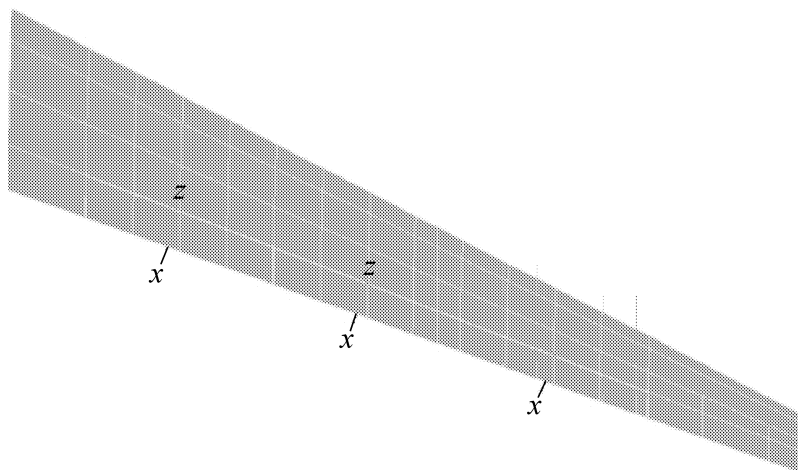


图3 复合材料机翼的有限元模型

Fig.3 Finite element model of a composite wing

4.1 结果分析

将优化后得出的结果转化为各个设计目标值，如表1 所示。增重至7 %， C_z 由负值转为正值， C_{mx} 也由0.50123 提高到0.55153，提高了10.04 %；增重至20 %， C_z 提高到0.06914， C_{mx} 提高到0.58057，提高了15.83 %。

表1 优化前后目标函数值

Table 1 Parallel optimization results

Mass gain / %	0	7	20
C_z	-0.05924	0.00234	0.06914
C_{mx}	0.50123	0.55153	0.58057
$g(x)$	0.00000	0.07657	0.14314

图4 给出了评估函数值、各设计目标值与蒙皮复合材料增重的关系曲线。从图4 可以看出，评估函数 $g(x)$ 、2 个设计目标 C_z 、 C_{mx} 的变化趋势大致相同，说明 $g(x)$ 能够较好地反映各设计目标的变化趋势。

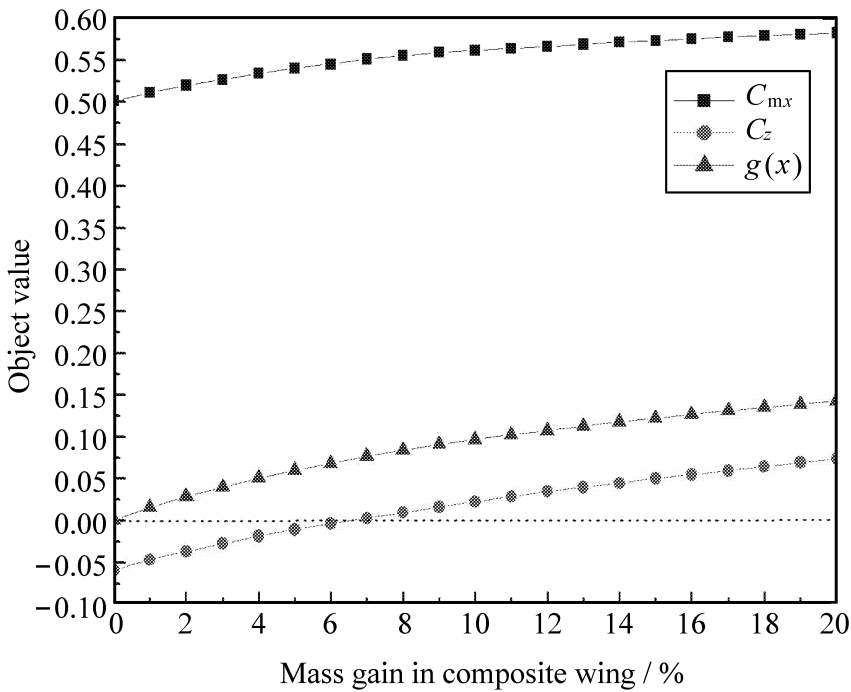


图4 优化目标与增重的关系

Fig 4 Relationship between objective values and mass gain

从图5 中可以看出随着蒙皮增重越来越多，添加角度和添加块数均趋于稳定，均落在一个稳定的区域之内，优化趋于收敛。添加角度正负角度的比例大致为1 2，符合非对称非均衡的铺层原理，利用其耦合效应来改善机翼的气动特性，从而解决副翼反效问题，如图5(a) 所示。

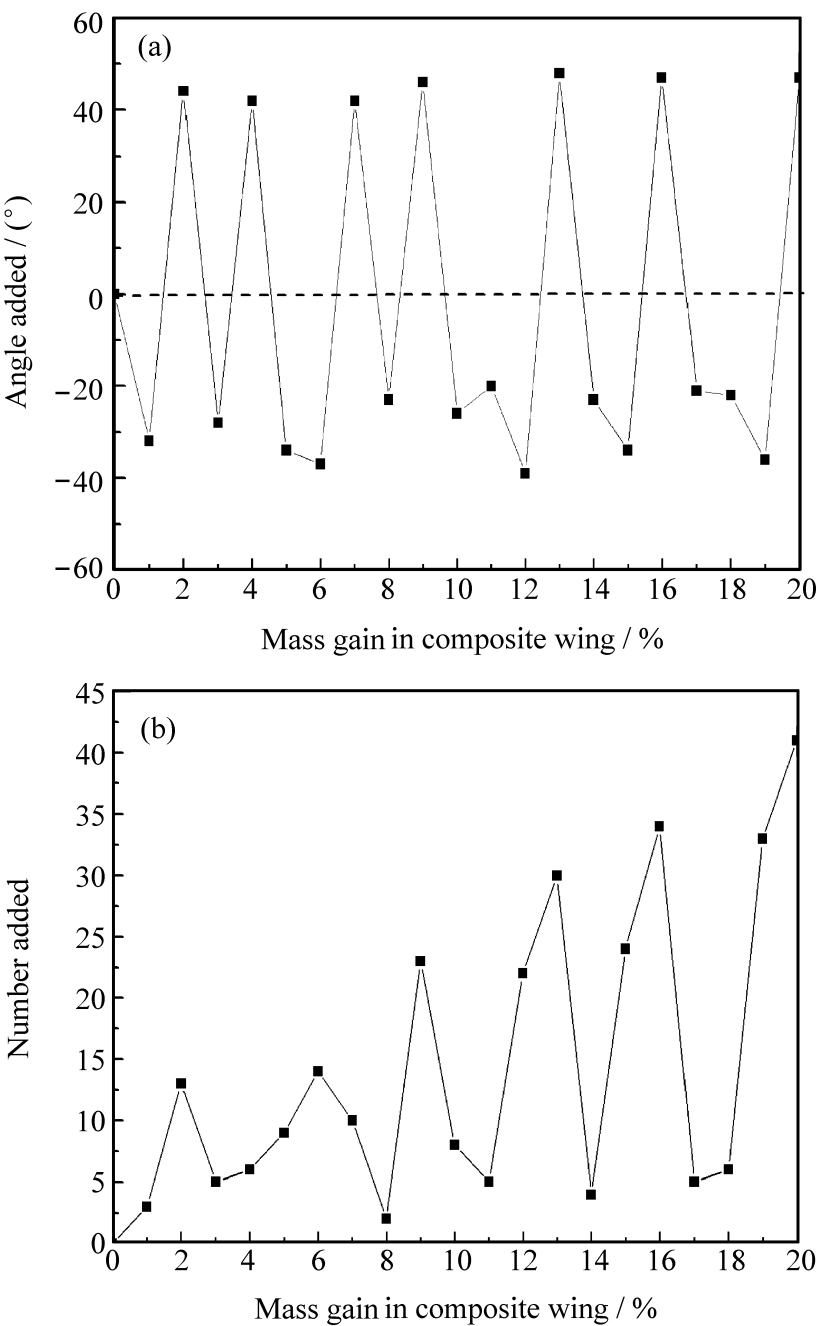


图5 设计变量与增重的关系

Fig.5 Relationship between design variables and mass gain

经过20 次迭代，进行1 次优化后的机翼蒙皮厚度如图6 所示。

4.2 计算效率

在基于5 台机器的网格系统上进行计算，该系统中1 台Linux 系统机器作为网格服务器，其余4 台 Windows 系统作为子节点进行适应度值计算。进行1 次优化(7 次迭代) 耗时31.72 h，和采用单机进行计算所需的104.44 h 相比，计算时间明显缩短，有效地提高了计算效率。实际计算效率为29.9 %，与单机遗传算法相比增加了数据通信时间和任务调度时间，因此，未达到4 台机器参与计算系统的理想状态值25 %。

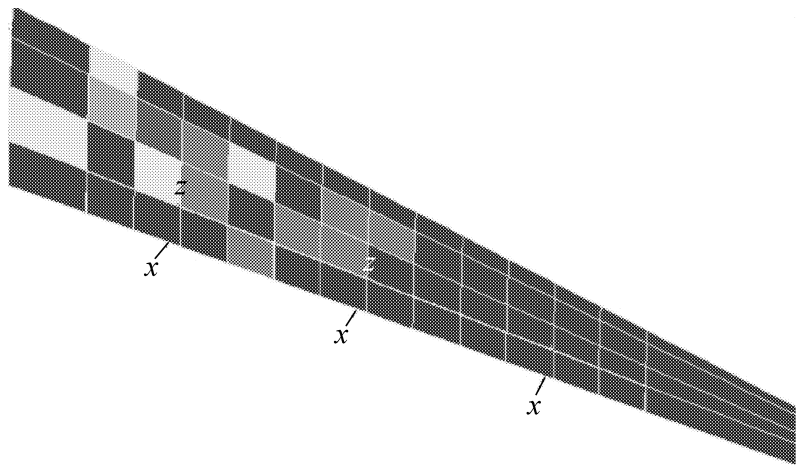


图6 优化后机翼蒙皮厚度云纹图

Fig.6 Thickness fringe of the wing after optimization

表2 计算效率

Table 2 Computation efficiency

Exhausted time	Single PC	Grid system
Per fitness calculation/ s	8. 50	2. 54
Per loop/ h	14. 92	4. 45
Mass gain 7 %/ h	104. 44	31. 72
Mass gain 20 %/ h	298. 40	89. 00

5 结 论

(1) 将分布式计算与遗传算法相结合, 开发出基于网格平台的多目标复合材料机翼优化系统, 并将通用有限元分析软件集成到系统中, 形成可以处理任意以有限元分析为基础的复合材料结构优化问题。

(2) 从计算结果看, 在蒙皮增重7 % 的情况下, 使得升力系数导数 C_z 由负值转为正值, 并使得滚转力矩系数导数 C_{mx} 提高了10 %, 达到了设计要求。形成的翼面铺层是常规设计所无法做到的, 体现了该优化系统的优势。

(3) 从计算效率来看, 计算效率为29.9 %, 与理想值25 % 相比, 资源的利用率为83.6 %。

参考文献:

[1] 沈 , 韩丽川, 吕继淮. 并行遗传算法在机载宽频带天线罩设计中的应用研究[J]. 航空学报, 2005, 26(2) : 158~161.
Shen Ji, Han Lichuan, Lü Jihuai. Application research of PGA on design of width band airborne radome [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2005, 26(2) : 158~161.

[2] Brighenti R. Fiber distribution optimization in fibre-reinforced composite by a genetic algorithm [J]. Composite Structures, 2005, 71(1) : 1~15.

[3] 王小平. 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 Xiaoping. Genetic algorithms ——Theory, applications and software utilization [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 2002.

[4] Guo S, Cheng W, Cui D. Optimization of composite wing structure for maximum flutter speed, AIAA- 2005- 2132 [R]. Austin: AIAA, 2005.

[5] 李 硕, 徐元铭, 张 俊. 基于神经网络响应面的复合材料结构优化设计[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5) : 134~140.
Li Shuo, Xu Yuanming, Zhang Jun. Composite structural optimization design based on neural network response surface [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5) : 134~140.

[6] Rajan S D, Belegundu A D, Lee D, et al. Finite element analysis & design optimization in a distributed computing environment, AIAA- 2004- 4453 [R]. New York: AIAA, 2004.

[7] Park J W, Park S H, Moon J J, et al. High-fidelity simulation-based optimum design utilizing computing grid technology, AIAA- 2005- 2309 [R]. Austin: AIAA, 2005.

[8] Foster I, Kesselman C, Tuecks S. The anatomy of the grid: Enabling scalable virtual organizations [J]. International Journal of High Performance Computing Applications, 2001, 15(3) : 200~222.

[9] 宁 葵, 严 毅. 分布式计算技术发展研究[J]. 微机发展, 2004, 14(8) : 14~20.
Ning Kui, Yan Yi. Study of development of distributed computing technology [J]. Microcomputer Development, 2004, 14(8) : 14~20.

[10] 修英姝, 崔德刚. 网格技术在航空制造业的应用研究[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(12) : 2073~2078.
Xiu Yingshu, Cui Degang. Application of grid technology in aeronautical manufacturing [J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(12) : 2073~2078.

[11] 张 军, 常 艳, 谢向辉, 等. 负载均衡的多级并行对等计算在新药研发网格中的实现[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(12) : 2047~2053.
Zhang Jun, Chang Yan, Xie Xianghui, et al. Realization of multi-level parallel load-balance P2P computation in the DDG [J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(12) : 2047~2053.

[12] 詹 浩, 段卓毅, 陈迎春. 基于遗传算法和分布式计算的翼形优化设计研究[J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(6) : 778~781.
Zhan Hao, Duan Zhuoyi, Chen Yingchun. On speeding up design of airfoil by genetic algorithm (GA) with distributed computing [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(6) : 778~781.

[13] 方 辉, 罗 阳. 分布式并行遗传算法在板材套料优化中的应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 35(1) : 85~88.
Fang Hui, Luo Yang. Application of distributed parallel genetic algorithm for large scale blank nesting plan [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2003, 35(1) : 85~88.