

# 局部寻优算子库在复合材料层合板强度优化设计中的应用

## Application of Local Optimization Operator Library on Strength Optimization Design of Composite Laminate

沈阳航空航天大学辽宁省飞行器复合材料结构分析与仿真重点实验室 王共冬  
沈阳航空航天大学航空航天工程学部 陈浩 王军

**[摘要]** 应用改进后的遗传算法对复合材料层合板的强度进行优化设计,给出局部寻优算子库的结构和组成,以层合板的强度比为优化目标,建立基于局部寻优算子的遗传算法优化模型。研究了不同局部寻优算子对铺层优化算法的收敛速度及铺层优化结果的影响。采用面向对象语言开发了改进后的复合材料层合板的强度优化系统,系统在已开发的材料库和零件数模库基础上,可自动获取材料和零件数模信息,最后通过算例求解最优强度时的铺层顺序。将优化结果和标准遗传算法的结果进行对比分析,证明了优化模型的有效性和改进后遗传算法的优越性。

**关键词:** 复合材料层合板 局部寻优 遗传算法 强度

**[ABSTRACT]** The stacking sequence of composite laminate is optimized by using improved genetic algorithm based on local optimization operator library. The structure and flow of local optimization operator library are given and the mathematic model is proposed to optimize the laminate using the strength ratio. The research that the different local optimization operator libraries are of benefit to the convergence rate and optimization result is done. The laminate strength optimization system of composites is developed by the object-oriented programming. Based on the developed material and part database, the laminate material and part feature can be gotten automatically. With selecting various local optimization operators of improved genetic algorithm, the optimization results and laminate sequence can be achieved. The comparisons of the optimization results and standard genetic algorithm calculation show the validity of optimization model and superiority of improved genetic algorithm based on local optimization operator library.

**Keywords:** Composite laminate Local optimization Genetic algorithm Strength

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.16.098

复合材料凭借强度高、刚度大、质量轻,并且抗疲劳、减振、耐高温等一系列优点在航空航天领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>,复合材料层合板的优化设计变得尤为重要。大量的研究工作集中在层合板优化算法上,例如模拟退火算法、遗传算法、响应面法、分支界定理论、粒子群算法、人工蚁群算法等。Fzlzon、Faggiani<sup>[2]</sup>使用遗传算法改进了复合材料层合板的二次不稳定性的屈服强度,研究了二次不稳定性对结构设计的影响;Carrera、Miglioretti<sup>[3]</sup>根据经典复合材料层合板理论,用遗传算法对不同边界条件、力学特性的薄板的剪切变形的高阶理论和多层板理论进行了优化研究;Marín、Trias<sup>[4]</sup>利用神经网络和遗传算法对复合材料层合板在湿热载荷下的刚度进行了优化;Sadr、Ghashochi<sup>[5]</sup>以层合板的层数、铺层角度、边界条件和层合板的长宽比为设计条件,用精英遗传算法和有限条法对复合材料层合板的基本频率进行了优化设计;Jin<sup>[6]</sup>利用主从式并行遗传算法对大型翼盒类零件的结构进行了优化,使优化时间更短,效率更高;Seresta等<sup>[7]</sup>提出了一个简单的适用于多层叠复合材料层合板设计的遗传算法框架,有效地解决了独立设计层合板时相邻层合板间不匹配的问题。李真等<sup>[8]</sup>利用改进后的蚁群算法对复合材料层合板的最小层数和铺层角度进行了优化,证明了改进后的蚁群算法效率更高,速度更快;谢强等<sup>[9]</sup>构建了求解三维应力的准三维有限元模型,进行了基于渐进损伤的复合材料层合板的强度预测;李明等<sup>[10]</sup>分析了含孔的复合材料层合板的破坏模式和拉伸强度,研究了孔的形状和位置对层合板强度的影响。

目前基本遗传算法在实际的工程优化中存在着大量不足,如搜索效率低、易“早熟”,不能保持个体的多样性等。针对遗传算法的这些不足,本文对遗传算法进行改进,加入了局部寻优策略,建立了局部寻优算子库,采用强度比建立适应度函数,对复合材料层合板的强度进行了优化。详细分析了局部寻优算子库中的贪婪算法和模拟退火算法,并将2种算法进行比较,研究分析了局部寻优算子对遗传算法和最优铺层顺序的影响。

## 1 优化设计模型

### 1.1 适应度函数的确定

针对复合材料层合板结构的优化设计,以强度为优化目标,并引入强度比的概念。强度比就是层合板在作用应力下,极限应力的某个分量与其对应的作用应力分量的比:

$$R = \sigma_{i(a)} / \sigma_i, \quad (1)$$

其中,  $\sigma_{i(a)}$  是层合板的许用应力,也是层合板的复杂应力的分量;  $\sigma_i$  为工作载荷在层压壳结构构件上引起的工作应力分量。将许用应力  $\sigma_{i(a)}$  代入 Hill-蔡(S. W. Tsai)强度理论,可以推导出关于强度比  $R$  的二次方程:

$$\begin{aligned} & (F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2)R^2 + \\ & (F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2)R - 1 = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_6 = \tau_{12}$ , 而强度系数张量  $F_{ij}$ 、 $F_i$  可以用材料的拉伸/压缩/剪切强度确定:

$$\begin{aligned} F_{11} &= \frac{1}{X_t X_c}, F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c}, F_{66} = \frac{1}{S^2}, F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}, \\ F_2 &= \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}, F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}}. \end{aligned} \quad (3)$$

由式(1)的定义可知,  $R$  可以表示材料的安全系数,  $R=2$  时意味着工作应力还得增大 1 倍材料才能失效; 于是材料失效时, 还可增加的应力倍数为  $R-1$ , 本文中的优化模型的适应度函数可表示为<sup>[11]</sup>:

$$F = \min(R(i) - 1) \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

其中,  $n$  为层合板的层数,  $R(i)$  为每单层的强度比。本文中的优化过程可以做如下表述: 给定载荷和层合板的厚度及层数, 先确定每个层合板中单层板强度比的最小值, 然后再比较这些最小值, 找到最小值中的最大值, 就是要求的层合板。比如  $A_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, k$ ) 为层合板,  $a_{kj}$  ( $j=1, 2, 3, \dots, n$ ) 为第  $k$  个层合板的单层板, 首先确定  $a_{kj}$  ( $j=1, 2, 3, \dots, n$ ) 的最小值  $a_{kl}$  (取  $l$  时为强度比最小值), 然后找出每个层合板的  $a_{il}$ , 再从这些强度比最小值  $a_{il}$  中找出最大值  $a_{ml}$ , 这样就找出了最优化的层合板  $A_m$ 。

### 1.2 层合板优化的约束条件

在铺层结构设计中, 有很多的设计要求, 而本设计模型遵守以下约束条件: 避免使用同一方向的铺层组(连续铺层为铺层组), 如果使用, 不得多于 4 层。

### 1.3 染色体的编码策略及解码

本优化模型选用的铺层顺序为  $0^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $90^\circ$  标准铺层 4 个铺层角度, 是离散型的铺层角度, 所以本文中的染色体编码策略采用实数编码。本算法中的染色体编码策略和解码过程为:

编码:  $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ] \rightarrow [1, 2, 3, 4]$ ;

解码:  $[1, 2, 3, 4] \rightarrow [0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]$ 。

### 1.4 遗传操作

(1) 选择。本文中的选择算子采用的是比例选择算子。个体被选择的概率与其适应度成正比<sup>[12]</sup>, 设种群大小为  $M$ , 个体  $i$  的适应度函数为  $f_i$ , 则个体  $i$  被选中的概率  $p_i$  为:

$$P_i = \frac{1}{f_i} / \sum \frac{1}{f_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, M). \quad (5)$$

(2) 交叉。本文的选择的交叉方式为单点交叉。所谓单点交叉就是指在个体编码中随机产生一个交叉点, 然后两个相配对染色体在交换交叉点前面的染色体。

(3) 变异。本文中的变异方式为: 在基因串中随机选择一个变异位置, 然后从基因串中的 [1, 2, 3, 4] 随机产生一个实数替换该位上的数值(基因值)。

## 2 算法的描述

改进后的遗传算法和基本遗传算法的根本区别就在于在遗传操作之后加入了局部寻优算子, 大量的局部寻优算子建立了局部寻优算子库, 图 1 是本文算法的流程图。

本文开发的优化系统可以通过局部寻优算子库中

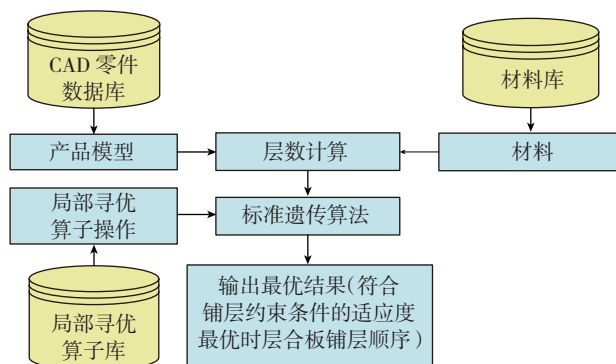


图1 基于局部寻优算子库的遗传算法流程图

Fig.1 Genetic algorithm flowchart based on local optimization operator library

算子的选择, 构成不同的遗传算法, 可以通过不同的算法得到不同的优化结果, 从而使优化结果更具多样性和实用性。其算子库的构成形式见表 1。

本文主要对其中模拟退火算子和贪心算子进行研究。

## 3 数值算例

### 3.1 数值算例的给出

假定有 1 个  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$  对称均衡复合材料层合板需要设计, 优化目标是拉伸强度最大, 层合板由 16 层单层组成, 每单层板的厚度  $h_0=0.125\text{mm}$ , 载荷

表1 局部寻优算子库的结构

算子序号	算子名称	算子函数名	算子代码
Operator 1	模拟退火算法	simulated annealing algorithm	Operator 1.txt
Operator 2	贪心算法	greedy algorithm	Operator 2.txt
⋮	⋮	⋮	⋮
Operator n-1	禁忌搜索	tabu search	Operator n-1.txt
Operator n	导引式局部搜索	guided local search	Operator n.txt

$M_x=M_y=M_{xy}=0$ ,  $N_x=500\text{kN/mm}$ ,  $N_{xy}=N_y=0$ 。本算例中选用的材料的力学性能见表2。算例中的局部寻优算子从算子库中选取,为了说明改进后的遗传算法的先进性,本文分别选用了模拟退火算法和贪恋算法对其进行优化计算,基本参数见表3。

### 3.2 计算过程及其结果

图2是利用面向对象编程工具开发层合板强度的优化系统。在图2界面中左边是材料的选定和算法参数的设置以及施加载荷的大小,界面的中间部分是程序运行的适应度值进化图和局部寻优算子库,而界面的最右边的显示框内显示的是迭代进化的过程(包括进化的遗传代数以及当前代数的适应度值和对应的解)。

由图2可知在不考虑层间应力的情况下,单一材料的层合板仅在X向受载的时候,要求拉伸强度最大的理想铺层结果是 $[0]_s$ ,优化结果较直观和容易理解。但实际生产中为了减少2种定向层之间的层间分层,应使每一单层组中单层尽量少,一般不超过4层。这样出现了理论优化结果和实际应用不相符情况,所以本文加入了一个铺层约束(防分层约束)。图3是2种改进算法与标准遗传算法得到的结果比较。

### 3.3 优化结果分析

(1)由图2可以看出,不给任何优化约束时的标准遗传算法经过强度优化后的最优适应度对应的铺层数全部为 $0^\circ$ ,这样是不符合复合材料层合板的工程应用的,必须对优化结果进行约束调整。按照本文设定的

表2 材料的力学性能

$E_1/\text{GPa}$	$E_2/\text{GPa}$	$G_{12}/\text{GPa}$	$\nu_{12}$	$X_t/\text{MPa}$	$X_c/\text{MPa}$	$Y_t/\text{MPa}$	$Y_c/\text{MPa}$	$S/\text{MPa}$
141	9.7	5	0.322	1722	832	60	136	113

表3 改进后遗传算法参数

全局搜索(遗传算法)				局部搜索(模拟退火)			
$M$	$p_c$	$p_m$	$T_0$	$T$	$L$	$a$	Tend
30	0.85	0.05	230	100	1000	0.95	30

其中: $M$ 为初始种群数, $p_c$ 为交叉概率, $p_m$ 为变异概率, $T_0$ 最大迭代次数。

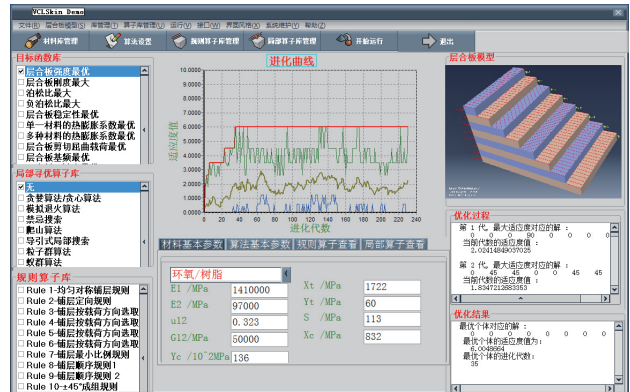


图2 层合板铺层优化界面

Fig.2 Main menu of optimization of laminate

优化约束条件对其进行约束,得到的铺层结果由原来的 $0^\circ$ 层组变成了 $[0/0/-45/0/0/45/0/0]$ 。铺层顺序,符合复合材料层合板的工程应用,使本文中的算法对层合板的优化更具实用性。

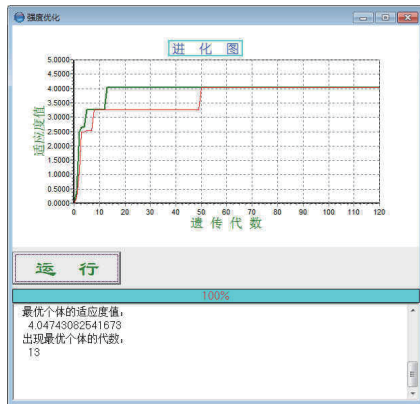
(2)由图3(a)分析可以得出,标准遗传算法中的适应度函数收敛到4.04743082,达到最优解,需要在第47代才能实现;而加入了模拟退火局部寻优的改进后的遗传算法在第13代就得到了适应度函数最大值4.04743082,得到最优解。收敛速度上加以比较的话,基于模拟退火的改进后的遗传算法要优于标准的遗传算法,更适合复合材料层合板的铺层顺序优化。同样分析图3(b)也可以得出同样的结论。

(3)由图3(b)分析可以得出,改进后的遗传算法在优化过程中的第7代进入早熟,但在第16代跳出早熟,优化到最优解;而标准遗传算法则分别在在第4到第24代进入早熟,到第25代才优化到最优。这说明改进后的遗传算法比标准遗传算法能更快更好地跳出早熟,更快地收敛到最优解。同样分析图3(a)也可以得出同样的结论。

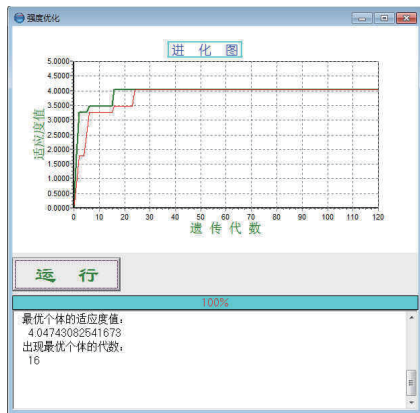
## 4 结论

以复合材料层合板拉伸强度比为优化对象,利用改进后的遗传算法进行建模,借助面向对象编程语言,开发了复合材料层合板强度优化系统,建立了局部搜索算子库。该系统可以选定材料属性,设定好改进后的遗传算法的参数,以及选择局部搜索算子,计算出相对应的铺层顺序。

在铺层优化过程中引入了铺层优化的约束条件,很好地利用实际生产中的经验条件,提高了优化结果的实用性;在算法设计时,引入了局部寻优算子库,可以选择不同



(a) 模拟退火算法



(b) 贪心算法

图3 改进GA和SGA运行结果的比较

Fig.3 Operation result comparison between improved genetic algorithms and standard genetic algorithm

的改进后的遗传算法对铺层顺序进行优化,提高了优化结果的准确性。

### 参考文献

- [1] 张大厚,王继辉. 复合材料在建筑领域的使用现状及发展方向. 武汉理工大学学报, 2009, 31(4):63-66.
- [2] Falzon B G, Faggiani A. The use of a genetic algorithm to improve the post buckling strength of stiffened composite panels susceptible to secondary instabilities. Composite Structures, 2012, 94(3):883-895.
- [3] Carrera E, Miglioretti F. Selection of appropriate multilayered plate theories by using a genetic like algorithm. Composite Structures, 2012, 94(3):1175-1186.
- [4] Marín L, Trias D, Badalló P, et al. Optimization of composite stiffened panels under mechanical and hygrothermal loads using neural networks and genetic algorithms. Composite Structures, 2012, 94(11):3321-3326.
- [5] Sadr M H, Ghashochi B H. Optimization of laminated composite plates for maximum fundamental frequency using Elitist-Genetic algorithm and finite strip method. Journal of Global Optimization, 2012, 54(4):707-

728.

- [6] Jin P. Structure optimization of large composite wing box with parallel genetic algorithm. Journal of Aircraft, 2011, 48(6):2145-2148.
- [7] Seresta O, Abdalla M M. A genetic algorithm based blending scheme for design of multiple composite laminates//Proceedings of the 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009:318-329.
- [8] 李真,陈秀华,汪海. 基于蚁群算法的复合材料层合板屈曲优化. 上海交通大学学报, 2012, 46(5):768-773.
- [9] 谢强,李亚智,李彪等. 基于准三维有限元模型的复合材料层合板强度预测. 科学技术与工程, 2012, 12(13):3160-3165.
- [10] 李明,马力,吴林志,等. 含孔复合材料层合板拉伸强度研究. 哈尔滨工业大学学报, 2011(S1):1-5.
- [11] 王共冬,陈彦海,邱福生. 基于启发式知识和自适应遗传算法的复合材料铺层优化设计. 玻璃钢/复合材料, 2009(2):3-6.
- [12] 冯消冰,黄海,王伟,等. 基于遗传算法的层压板强度优化设计. 玻璃钢/复合材料, 2012(3):7-13.

(责编 亿霖)

(上接第 97 页)

削特征,且沟槽深度比普通磨削时浅。当磨削深度为  $12\mu\text{m}$  时,普通磨削表面破碎严重,呈脆性去除状态,而超声磨削表面仅有局部少量破碎现象,还处于脆性-延性混合模式,这说明超声振动磨削有比普通磨削大得多的临界延性磨削深度,利用超声振动磨削能高效地获得精密加工表面。

### 3 结论

- (1) 相同磨削深度下,超声磨削表面粗糙度远小于普通磨削,而当增加磨削深度时,超声磨削表面粗糙度增加趋势缓慢。
- (2) 超声振动大大增加了材料的延性磨削区间。
- (3) 超声振动磨削时可以获得大的临界延性磨削深度。

### 参考文献

- [1] 李伯民,赵波. 现代磨削技术. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [2] Kitajima K, Cai G Q, Nelal K. Study on mechanism of ceramics grinding. Annals of the CIRP, 1992, 41(1): 367-371.
- [3] Inasaki I. Grinding of hard brittle materials. Annals of CIRP, 1987, 36(21): 463-471.
- [4] 何宏发,张耀辉,陈友良,等. 陶瓷半延展性磨削试验研究. 金刚石与磨料磨具工程, 1998, 1(103):25-28.
- [5] Guo C S, Chand R. Adaptive ceramics machining//The ultra-hard materials technical conference. Windsor, 1998:28-30.

(责编 小城 谷雨)