

基于自适应遗传算法的层合板铺层优化设计

杨洋,代文猛,年春波

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对复合材料层合板结构设计中因铺层角度多变、难以确定最优铺层方案的问题,提出一种基于自适应遗传算法的铺层优化设计方案。该方案以层合板铺层角度为变量,以层合板最大形变量为优化目标,采用整数编码策略,运用 MATLAB 平台进行遗传算法设计。在寻优过程中调用 ABAQUS 对层合板进行有限元分析并将分析结果返回至 MATLAB 进行优化计算。通过对比经典遗传算法表明,该算法收敛快,更易达到优化设计的目的。

关键词:复合材料;自适应遗传算法;优化设计

中图分类号:TP202 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0022-04

Optimum Design of Composite Laminates Based on Adaptive Genetic Algorithms

YANG Yang, DAI Wenmeng, NIAN Chunbo

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In view of the problem that it is difficult to determine the optimal ply plan in the structural design of composite laminates because of the variable ply angles, this paper proposes an optimal ply design scheme based on adaptive genetic algorithm. In the optimal ply design scheme, the ply angle of composite laminates is taken as a variable, its maximum deformation is used as the optimization objective, and the integer coding strategy is adopted. The genetic algorithm is designed on the platform of MATLAB. In the optimization process, ABAQUS is used to carry out finite element analysis of laminates and the results are returned to MATLAB for optimization calculation. Compared with the classical genetic algorithm, the fast convergence of the adaptive genetic algorithm is proved, and the optimal design is achieved.

Keywords: composite; adaptive genetic algorithm; optimum design

0 引言

复合材料主要由树脂基体和增强纤维组合而成,因其具有比强度高、比刚度大且具有良好的可设计性能等优点,纤维增强复合材料在工业领域得到越来越广泛的应用^[1-3]。复合材料的可设计性能主要体现在充分利用复合材料铺层的各向异性特性和结构的层压特性上,在复合材料结构的设计过程中,通过调整复合材料各角度铺层的顺序和百分比可以得到满足设计要求的最佳结构。然而铺层优化设计并不是简单的线性函数求解问题,而是离散的层叠顺序优化设计问题^[4],该类问题具有很大的解空间并且其解具有无序性和干扰性。传统思路是建立大量的铺层结构而后逐一验证,其成本较高、效率较低。

遗传算法是模仿自然界“优胜劣汰,适者生存”的生物进化机制,运用计算机技术发展起来的随机全局搜索和优化算法,既适合于线性问题又适合于非线性问题的求解,尤其适合于离散设计变量优化问题以及混合离散设计变量的复杂优化问题。目前遗传算法在复合材料结构的优化设计方面得到了越来越多的国内外研究人员的重

视^[5-9]。冯消冰等^[10]针对铺层结构参数具有离散型的特点,采用整数编码策略并针对结构强度优化的目标构造适应度函数,应用遗传算法对大型风机复合材料叶片进行了铺层优化设计。设计的结果表明,在铺层的优化设计中应用遗传算法是可行和可信的。丁玲等^[11]采用整数编码的遗传算法研究了无人机机翼复合材料蜂窝夹层结构蒙皮的铺层优化问题,并通过有限元分析和静力试验验证了优化结果的有效性。武佳男等^[12]利用 MATLAB 编程联合 ANSYS 有限元分析对复合材料声呐罩铺层结构进行优化设计,结果表明优化设计后的声呐罩强度性能显著提高。史旭东等^[13]通过 MATLAB 调用 Patran 进行建模分析,编写遗传算法程序对大展弦比机翼进行结构优化设计。然而上述遗传算法收敛效率低,可靠性差,故而本文基于改进自适应遗传算法对层合板铺层进行优化设计。

1 自适应遗传算法

针对遗传算法早熟、收敛慢、可靠性低的缺点,提出了一种新的概率调整算法:当某些个体的适应度 F_i 大于平均适应度 F_{avg} 时,为了加快淘汰劣质基因和不良个体,需

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575266)

第一作者简介:杨洋(1993—),江苏南京人,硕士研究生,研究方向为 CAD/CAM、复合材料自动铺丝技术。

增大交叉概率 P_c 和变异概率 P_m ; 当某些个体的适应度 F_i 小于或等于平均适应度 F_{avg} 时, 为了保留优良基因和优秀个体, 需降低 P_c 和 P_m , 即:

$$P_c = \begin{cases} P_{c0}(F_i - F_{avg}) / (F_{max} - F_{avg}) & F_i > F_{avg} \\ P_{c0}(F_{max} - F_i) / (F_{max} - F_{avg}) & F_i \leq F_{avg} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m0}(F_i - F_{avg}) / (F_{max} - F_{avg}) & F_i > F_{avg} \\ P_{m0}(F_{max} - F_i) / (F_{max} - F_{avg}) & F_i \leq F_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{c0} 为基础交叉概率; P_{m0} 为基础变异概率。

当 $F_i \leq F_{avg}$ 时, $(F_{max} - F_i) / (F_{max} - F_{avg}) \geq 1$, 故需要设定 P_m 和 P_c 的上限。此处规定 $P_c \leq 1, P_m \leq 0.1$ 。

2 层合板铺层优化算法设计与实现

基于自适应遗传算法的复合材料层合板铺层优化算法设计以经典层合板理论为基础, 以遗传算法为核心, 以 MATLAB 与 ABAQUS 联合使用为主要实现平台, 主要实现过程包括编码、设定初始种群、给定约束条件、有限元分析、计算适应度、遗传操作、追踪遗传算法性能等 7 个方面。

a) 编码。由于复合材料层合板铺层优化的变量为离散变量, 而遗传算法的整数编码策略在解决离散变量的寻优问题时具有独特的优势, 因此本文采用整数编码方式对允许使用的 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]$ 铺层进行编码, 即 $[0/1/2/3]$ 分别代表角度为 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]$ 的铺层。

b) 初始化种群。设定初始种群数目、最大遗传代数、种群代沟、交叉概率、变异概率等遗传算法相关参数。

c) 约束条件。复合材料铺层结构的设计一般需要考虑以下两个原则:

1) 同一复合材料构件中应包含 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]$ 4 种角度铺层, 以应对复杂的受载情况。

2) 同一铺设角的单层连续铺放, 其层数不得超过 4 层, 以免引起树脂基体开裂以及层间应力增高。

d) 有限元分析。首先在 MATLAB 中依据种群中不同个体的编码基因状况修改有限元分析模型的 INP 文件, 更新各角度铺层的分布情况, 然后调用 ABAQUS 进行有限元分析, 并输出分析结果。调用方式如下:

```
! abaqus job = Job-laminate
system('abaqus cae noGUI=abaqus2.py')
```

使用 MATLAB 读取层合板各节点处的应变值, 并保存最大应变值作为该个体的目标值。

e) 计算适应度值。遗传算法通过对目标值分配适应度值确定相应个体被选中进行遗传操作的概率。文中利用 ranking 函数将个体适应度值进行排序返回。该函数能够按照个体的目标值由小到大的顺序进行排序, 并返回包含个体适应度值的列向量。

```
FitnV = ranking(-ObjV)
```

f) 遗传操作。通过 select 函数依据个体适应度值选择个体组成子代种群 SelCh, 个体的适应度值越大, 则被选中的几率越高。

```
SelCh = select('sus', Chrom, FitnV, GGAP)
```

通过 recomb 函数依据交叉概率 RecOpt 对子代种群染色体进行基因交叉重组操作并返回新的种群。

```
SelCh = recomb('reclis', SelCh, RecOpt)
```

通过 mutbga 函数依据变异概率 MutOpt 对子代种群染色体进行基因变异操作并返回新的种群。

```
SelCh = mutbga(SelCh, FieldDB, MutOpt)
```

因为代沟的选择作用使得子代种群规模小于原始种群, 故需要对子代种群大小进行恢复。这里采用恢复函数 reins 进行恢复。

```
[Chrom, ObjV] = reins(Chrom, SelCh, 1, 1, ObjV, ObjVSel)
```

g) 追踪遗传算法性能, 记录最优解。使用 trace 函数记录每一代种群的最大适应度值, 并记录最优解, 使用 plot 函数绘制出各代种群的最优解变化曲线。

具体流程如图 1 所示。

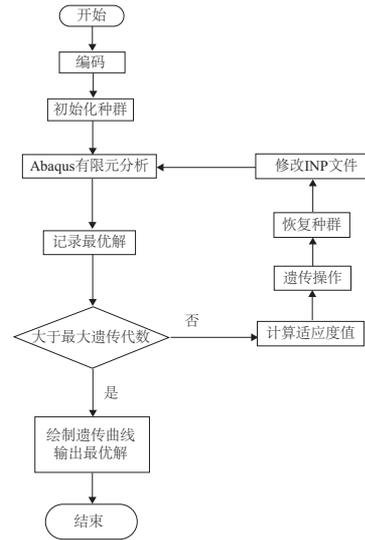


图 1 流程图

3 算例及优化结果

为了验证该算法针对复合材料层合板铺层优化问题的有效性, 选用 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的单层厚度为 0.25 mm 的 16 层层合板进行铺层优化设计。该层合板四边简支, 上表面施加竖直向下的 1 MPa 表面压强。初始种群数目为 40, 最大遗传代数为 100, 种群代沟为 0.9, 初始交叉概率为 0.7, 初始变异概率为 0.05, 材料选用 AS4/9773 复合材料, 其材料参数如表 1 所示。分别使用经典遗传算法和经过改进后的自适应遗传算法对该复合材料层合板进行优化设计。

表 1 AS4/9773 复合材料参数

参数	数值
纤维方向弹性模量 E_1/GPa	130.00
纤维纵向弹性模量 $E_2, E_3/\text{GPa}$	9.24
面内切变模量 $G_{12}, G_{13}/\text{GPa}$	5.10
层间切变模量 G_{23}/GPa	2.00
泊松比 μ_{12}, μ_{13}	0.36
泊松比 μ_{23}	0.10

单向载荷下的层合板铺层优化过程如图 2 所示。从

图2中可以看出,随着遗传迭代次数的不断增加,目标函数值(即最大形变量)也在呈现阶梯式下降直至收敛于最小值。在11代以前,优化曲线一直在波动,说明遗传算法在最大限度地搜索全域铺层角度的排列组合。11代以后,优化曲线趋于平稳,说明在全部铺层方案中找到了相应的最优解。

从图2与图3自适应遗传算法与经典遗传算法的对比中可以看出,两者的优化结果相同,经典遗传算法需要迭代20多代左右才能收敛,而自适应遗传算法迭代运算至11代即收敛,展现了自适应遗传算法的快速收敛性。

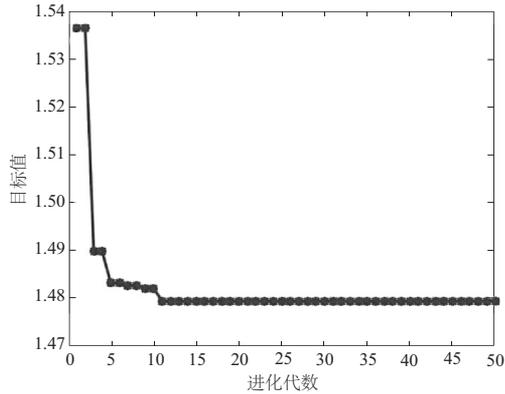


图2 自适应遗传算法

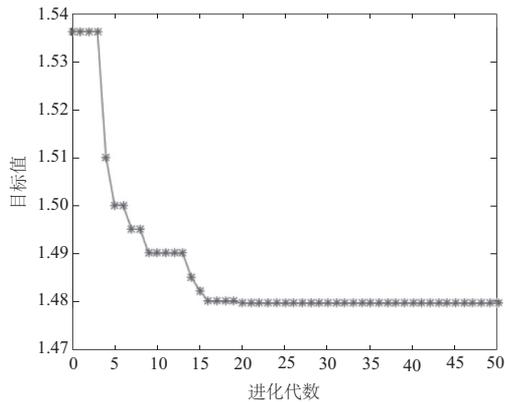


图3 经典遗传算法

表2所示的是铺层部分优化结果。在铺层优化的过程中,由于上表面施加的表面压强产生较大的剪切力,所以尽量保留了 0° 和 90° 的铺层,逐渐增加 $\pm 45^\circ$ 铺层,用以抵抗横向载荷与纵向载荷。层合板的最大形变量从1.5361 mm降低到了1.4796 mm,可见层合板的强度有了显著的增强。

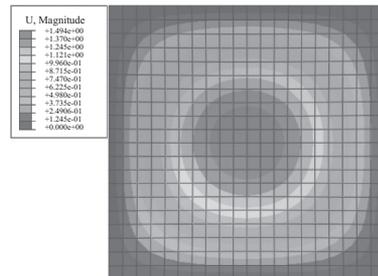
4 层合板铺层优化的有限元仿真验证

为了进一步验证优化设计的有效性,针对表2中所取得的优化铺层结果进行有限元仿真验证。将表2铺层部分优化结果中获得的铺层角度,利用ABAQUS软件进行有限元仿真以获得层合板最大形变量的变化趋势。

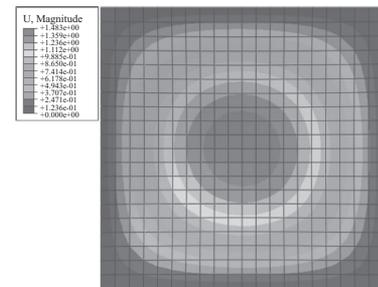
表2 铺层部分优化结果

遗传代数	铺层角度(16层)	最大形变量/mm
1(a)	[90/-45/-45/-45/45/0/45/45/45/-45/0/-45/-45/45/-45/45]	1.536 1
3(b)	[90/-45/45/-45/45/0/90/0/0/45/45/0/-45/45/-45/45]	1.494 1
5(c)	[90/-45/45/-45/45/0/90/0/0/45/-45/0/-45/45/-45/45]	1.483 3
7(d)	[90/-45/45/-45/45/0/90/0/0/-45/-45/-45/-45/45/-45/45]	1.482 8
9(f)	[90/-45/45/-45/45/0/90/0/0/-45/-45/0/-45/45/-45/45]	1.482 2
11(g)	[90/-45/45/-45/45/0/90/45/0/-45/-45/45/-45/45/-45/45]	1.479 6

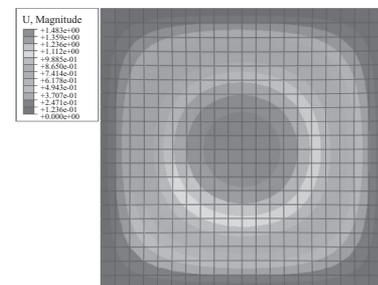
图4为优化后层合板形变量云图。从4张对比图中可以看出层合板的最大形变量经过优化后在逐渐减少,说明层合板强度在不断提升。可以体现逐步达到优化目的。从自适应遗传理论中可以得出,经过不断优化,最大形变量最终值收敛于1.4796 mm。最后一张云图显示形变量从外围向中部逐渐增大并在中心呈现最大值约是1.48 mm,与算例中理论经过遗传迭代,最终趋于稳定值1.4796 mm相一致,说明本文建立的优化平台可靠有效。



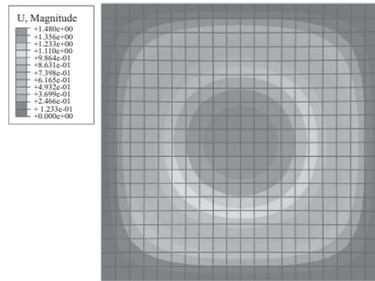
(a) 遗传代数3



(b) 遗传代数5



(c) 遗传代数7



(d) 遗传代数11

图4 优化后层合板形变量云图

5 结语

本文在复合材料力学经典层合板理论的基础上,借助 ANSYS 实现了复合材料的分析;以经典遗传算法为基础,提出了一种自适应遗传算法,通过 MATLAB 建立自适应遗传算法程序。两者相结合建立了复合材料铺层设计优化平台,并得到以下结论:

1) 以层合板最大形变量为优化目标,利用提出的自适应遗传算法,依据适应度值调整个体的交叉概率和变异概率,相比于经典遗传算法的优化方案提高了算法的收敛速度。

2) 以单向载荷下层合板铺层优化设计为例进行了验证,结果显示优化后的层合板最大形变量显著减小,并对优化结果进行有限元仿真,仿真结果表明,理论上优化后的最大形变量与实际层合板在该铺层角度下形变量相一致,验证了该优化平台的可靠性与有效性。

参考文献:

- [1] 薛忠民. 中国玻璃钢/复合材料发展回顾与展望[J]. 玻璃钢/复合材料,2015(1):5-12.

(上接第10页)

4 结语

本文针对 IC10 合金开展了 600℃ 高温环境下的低周疲劳试验研究,分析了材料的力学行为与断裂机制,

1) IC10 高温合金在单个载荷内应力与应变保持单调变化关系,循环响应迟滞回线关于原点不对称。在整体寿命周期内,循环应力响应特征主要表现为初始循环硬化后进入循环稳定阶段,并在最终断裂前出现应力下降情况。IC10 合金在承受低周疲劳载荷作用时,大量位错集中于基体 γ 相,随着循环的进行,胞壁位错密度增大,在宏观上表现为所需的外载荷随着循环次数的增加而增大。

2) IC10 合金呈现出多种疲劳裂纹特征。在低应变水平下,材料断口表面光滑平整,且具有大量的滑移线;而在高应变水平下,材料表面粗糙且凹凸,微观上存在韧窝以及二次裂纹等,这主要与晶粒内部位错的增加以及晶界处微孔的产生有关。

- [2] 邢丽英,包建文,礼嵩明,等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报,2016,33(7):1327-1338.
- [3] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报,2007,24(1):1-12.
- [4] 修英姝,崔德刚. 复合材料层合板稳定性的铺层优化设计[J]. 工程力学,2005,22(6):212-216.
- [5] 鲁大伟,李书. 应用免疫遗传算法优化设计层合板铺层顺序[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(2):247-250.
- [6] TUAN L M, JAEHONG L. Stacking sequense optimization for maximum strengths of laminated composite plates using genetic algorithm and isogeometric analysis [J]. Composite Structures, 2014,116:357-363.
- [7] 金达锋,刘哲,范志瑞. 基于遗传算法的复合材料层合板削层结构铺层优化[J]. 复合材料学报,2015,32(1):236-242.
- [8] 史旭东,陈亮,张碧辉,等. 基于遗传算法的大展弦比复合材料机翼结构优化设计[J]. 航空工程进展,2015,6(1):110-115.
- [9] 李磊. 基于遗传算法的复合材料层合结构优化设计[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005:29-47.
- [10] 冯消冰,黄海,王伟. 大型风机复合材料叶片铺层优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料,2013(3):3-7.
- [11] 丁玲,孙辉,贾宏光,等. 应用遗传算法优化设计机翼复合材料蜂窝夹层结构蒙皮[J]. 光学精密工程,2014,22(12):3272-3279.
- [12] 武佳男,倪爱清,杨斌,等. 复合材料声呐导流罩铺层的遗传算法优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料,2017(11):80-85.
- [13] 史旭东,陈亮,张碧辉,等. 基于遗传算法的大展弦比复合材料机翼结构优化设计[J]. 航空工程进展,2015,6(1):110-115.

收稿日期:2019-01-15

参考文献:

- [1] 张鹏,朱强,秦鹤勇,等. 航空发动机用耐高温材料的研究进展[J]. 材料导报,2014(11):27-31.
- [2] 寇海军. 民航发动机高压压气机叶片多工况振动特性及疲劳研究[D]. 天津:天津大学,2017.
- [3] 聂聪,苏宏华,胡浩. 铸造高温合金 K423A 内圆车削工艺优化研究[J]. 机械制造与自动化,2018,47(4):17-20.
- [4] 张仕朝,于慧臣,李影. 不同应变比下 GH3030 合金的高温低周疲劳行为[J]. 机械工程材料,2014(1):56-59.
- [5] 安金岚,王磊,刘杨,等. 长期时效对 GH4169 合金组织演化及低周疲劳行为的影响[J]. 金属学报,2015(7):835-843.
- [6] 肖磊,冯赣江. 新型单晶高温合金 WZ4 的高温低周疲劳行为[J]. 热加工工艺,2019(2):50-54.
- [7] 于慧臣,李影,张国栋,等. 一种定向凝固镍基高温合金的高温低周疲劳行为[J]. 失效分析与预防,2008(1):1-6.
- [8] 杨功显,徐永锋,江雷,等. 一种镍基高温合金的低周疲劳性能[J]. 材料热处理学报,2012(8):45-52.

收稿日期:2019-02-26