

考虑强度和疲劳寿命影响的层合复合材料结构优化分析

王红岩, 崔海涛

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘要: 工程应用中对复合材料轻量化的要求在不断提高, 为了能够在满足工程应用对材料强度和疲劳寿命要求的同时, 达到减轻结构质量的目的, 研究了强度和疲劳寿命影响下的复合材料层合结构优化方法, 并在此基础上提出了一种基于参数化有限元技术和改进遗传算法的复合材料层合结构优化方法; 同时根据复合材料层合结构铺层参数属于离散型变量的特点, 将遗传算法编码改为联合整数编码, 并且为了能快速准确求出最优解, 提出了精英保留策略、交叉和变异自适应度策略; 最后, 基于 Visual Studio 和 ANSYS 进行联合仿真, 对所提出的方法进行验证, 仿真结果表明, 优化后的复合材料层合结构不仅能够满足强度和疲劳寿命的约束条件, 并且其质量减少到初始质量的 56.2%, 优化效果明显, 所提出的基于参数化有限元技术和改进遗传算法的复合材料层合结构优化方法是可行的。

关键词: 强度; 疲劳寿命; 层合复合材料; 铺层优化

Optimization Analysis of Composite Materials with Effect of Strength and Fatigue Life

Wang Hongyan, Cui Haitao

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Aerospace Power System, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The requirement of lightweight composite materials has been continuously improved in engineering application, in order to meet required by material strength and the fatigue life of the engineering application and achieve the purpose of structure mass reduction, the optimization method of composite laminated structure under the influence of strength and fatigue life is studied, and the optimization method of composite laminated structure based on parametric finite element technique and genetic algorithm is proposed. According to the characteristics of the composite laminated structure layer parameters belong to discrete variable, the genetic algorithm is transformed into a combined integer coding. In order to get the optimal solution quickly and accurately, elitism preserving strategy, crossover and mutation adaptive degree strategy are put forward. Finally, to verify the proposed method, the co-simulation based on the Visual Studio and ANSYS has been carried out, the simulation results show that the composite layer of the optimized structure can not only meet the constraints of strength and fatigue life, and the quality is reduced to 56.2% of initial mass, the optimization effect is obvious, which indicates that the optimization method of composite laminated structure based on parametric finite element technique and genetic algorithm is feasible.

Keywords: strength; fatigue life; laminated composite materials; layer optimization

0 引言

众所周知, 复合材料具有可设计性、高比强度、大比模量等诸多优点, 因此在航空航天、建筑、船舶、汽车等领域得到了快速而广泛的应用, 目前这些领域对材料轻量化的迫切要求也极大的推动了复合材料结构优化等方面的快速发展。层合结构材料亦是如此, 研究人员通过进行其进行合理的参数优化设计, 能够达到在减轻质量的同时, 保证材料的强度、疲劳等力学性能不下降, 甚至能够得到

进一步提升。

从近些年的研究成果来看, 复合材料的强度和疲劳寿命已经进行了大量试验研究^[1-6], 复合材料层合结构的铺层优化方法研究中, Erdal 等^[7]提出了一种新的二维复合结构优化设计方法, 采用了直接模拟退化算法, 每一层的纤维取向作为设计变量, 目标在于极大地提高复合材料的屈曲承载能力。Kazemi, M. 等^[8]介绍了平面的极坐标表示方法, 提出了三种优化方法, 一种是无约束优化, 另外两种是弯曲刚度和弹性模量约束。孙秦等^[9]以层合板经典力学理论为依据, 推导出层合板弯曲刚度是关于铺向角的线性叠加函数, 构造出关于弯曲刚度参数的优化模型来控制优化铺层顺序。

侯玉品等^[10]通过对复合材料层合结构优化参数进行可

收稿日期: 2018-01-14; 修回日期: 2018-03-08。

基金项目: 国家自然科学基金(51205190)。

作者简介: 王红岩(1991-), 女, 河北秦皇岛人, 硕士, 主要从事复合材料优化分析方向的研究。

行域分析, 随后对铺层参数与纤维分布参数进行联合分析, 并确定了联合优化模型以及具体的优化方法。姜封国^[11]首先基于强度理论建立复合材料面内破坏与分层破坏的安全余量公式, 并进行了可靠性分析, 最后基于改进遗传算法对复合材料层合结构进行了参数优化。柯俊等^[12]采用权重系数变换和混合的方法对遗传算法进行了改进, 并将其运用于复合材料参数优化中去, 使得材料的性能达到最优。陆振玉^[13]等提出了改进的自适应遗传算法, 其交叉和变异算子能在迭代过程中根据种群的迭代收敛趋势进行适应度调整。孙士平等^[14]以层合板基频、频率带隙为优化目标, 以给定基频和带隙为约束条件, 铺层角度和层数为两种离散铺层变量, 提出了一种自适应模拟退化 (SA) 改进算法。Zehnder N^[15]介绍一种采用遗传算法来全局优化层合复合材料的方法, 通过优化帆船的刚度来验证该方法的可行性。Lin C^[16]通过对遗传算法进行部分改进, 使得算法在进行层合结构优化时, 计算时间缩短、效率提高。可见遗传算法在层合结构的优化过程中越来越受关注。

国内外学者对复合材料层合结构的铺层优化分析中, 将强度和疲劳寿命作为约束, 通过改变铺层角度和铺层数, 以减轻质量, 降低成本, 提高性能的优化分析在所查阅的文献中还鲜有发现。

本文基于以上讨论, 研究了复合材料层合结构参数优化设计问题, 首先是通过对其具体结构以及铺层方式的分析, 建立了复合材料层合结构优化模型, 确定优化变量、目标函数以及约束条件; 并在此基础上对精英保留自适应度的遗传算法进行改进与重新设计, 并将改进遗传算法与具体优化模型想结合; 最后结合具体算例, 并基于 VC++ 与 ANSYS 联合仿真平台对其进行铺层参数优化设计, 以验证本文所提出来的优化方法的可行性。

1 优化模型建立

1.1 设计变量

确定铺层设计变量 X , 即铺层角度和 θ 层数 x 作为设计变量 $X = (\theta, x)$, 其中, $\theta \in (0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ)$, $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$, $x_{\min} = 8, x_{\max} = 32$ 。

1.2 目标函数

选择层合板的质量作为目标函数, 如式 (1) 所示, 通过减少铺层数达到减轻层合板质量的目标。

$$\min W = W(x) = \sum_1^x \min C \cdot x \quad (1)$$

式中, 其中 C 表示单层板质量。

1.3 约束条件

$$\begin{cases} P(x) > P_{ref} \\ N(x) > N_{ref} \\ \theta(0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ) \geq 10\% \\ \theta_1 = \theta_n, \theta_2 = \theta_{n-1}, \dots \\ H = H_1 = \dots H_n \end{cases} \quad (2)$$

P 为结构静强度, P_{ref} 为设计要求强度下限。 N 为结构疲劳寿命, N_{ref} 为设计要求疲劳寿命下限。为了保证材料在其他方向的力学性能, 要求每种铺层角度 θ 至少占总铺层数 10%, 铺层角度在 $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ 中选取, 要求 $\pm 45^\circ$ 铺层成对铺设, 对称铺设。铺层方式如图 1。

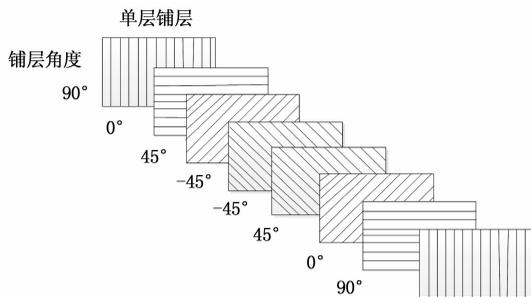


图 1 层合结构铺层方式

2 优化过程分析

本文首先研究精英保留自适应遗传算法的整个设计过程, 并加以改进, 然后将其应用于复合材料层合板铺层参数优化问题求解。通过深入研究 ANSYS 软件的调用方法, 发现 ANSYS 软件具有批处理的功能, 可实现模块化对 ANSYS 程序的调用, 而 VC++ 也可以实现系统调用的方式来执行 ANSYS 的批处理模式, 因此在优化过程中, 基于 Visual Studio 软件平台利用 C++ 语言编写遗传优化算法, 采用系统命令以批处理的方式来打开并调用 ANSYS 对所建立的有限元模型进行分析计算, 算出其实际强度与疲劳值, 优化过程流程图如图 2。

1) 遗传编码。通过分析层合板的结构特点, 为使得铺层数和铺层角度同时优, 本文提出一种整数编码方式来对遗传算法进行编码, 编码优化过程中用染色体编码串表示铺层变化方式。

2) 产生初始种群。根据给定的种群规模 Num, 随机分配一组个体。

3) 适应度值。个体的优劣程度依据个体适应度值判断。操作过程中, 被保留并进行下一步操作的个体具有较大的适应度值, 被淘汰的个体适应度值往往较小。

4) 遗传操作。标准遗传算法中算子包括选择、交叉、变异, 本文通过对标准遗传算法进行深入研究, 引用新方法即精英保留策略, 该方法有助于遗传算法收敛到全局最优解, 为提高计算效率, 本文交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 采用自适应度控制方式。

$$P_c = \begin{cases} P_{c0} \frac{(F_{\max} - F_i)}{(F_{\max} - F_{av})} & F_i \geq F_{av} \\ P_{c0} & F_i < F_{av} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m0} \frac{(F_{\max} - F_i)}{(F_{\max} - F_{av})} & F_i \geq F_{av} \\ P_{m0} & F_i < F_{av} \end{cases} \quad (4)$$

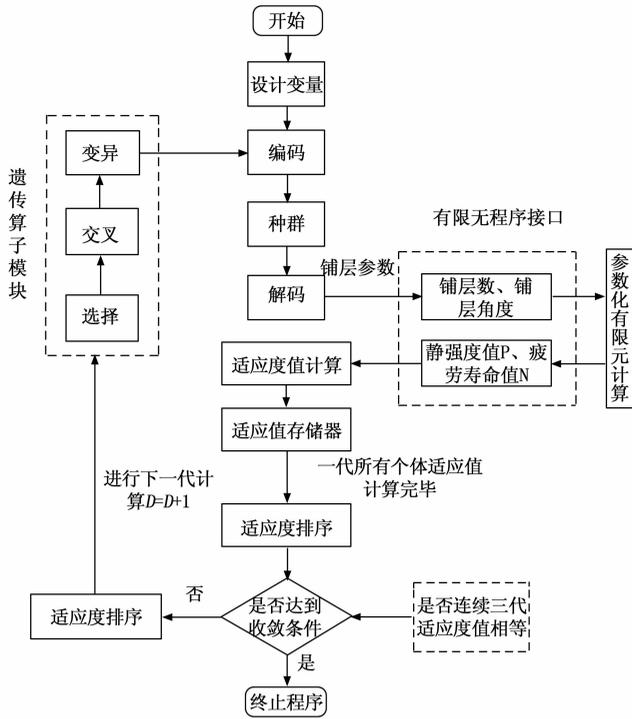


图 2 优化程序框图

P_{c0} 初始交叉概率, P_{m0} 为初始变异概率, F_{max} 为种群的最大适应度, F_{av} 为平均适应度。 F_i 为第 i 个个体的适应度。本文做如下假设: P_c 和 P_m 均与 $(F_{max} - F_{av})$ 成反比, 因为当 F_{max} 与 F_{av} 接近时, 种群趋于收敛, 应增大 P_c 和 P_m 的值; 反之, 则说明种群的多样性较强, 应减小 P_c 和 P_m 的值。其次, 假设 P_c 和 P_m 与 $F_{max} - F_i$ 的值成正比, 以防止优良基因结构遭到破坏, 必须使适应度大的解有较小的 P_c 和 P_m 。 P_c 和 P_m 的选取不仅依赖于 $F_{max} - F_i$ 的变化, 而且与每个个体的适应度 F_i 也有关, 即有公式 (3)、(4)。

5) 判断是否达到收敛条件, 若达到收敛条件终止计算; 否则重复步骤 3) ~5)。

3 优化算例与分析

3.1 优化问题描述

本文利用编写的优化程序对复合材料层合板进行铺层参数优化分析, 分别采用单约束优化模型和双约束优化模型。层合板的受力如图 3 所示。

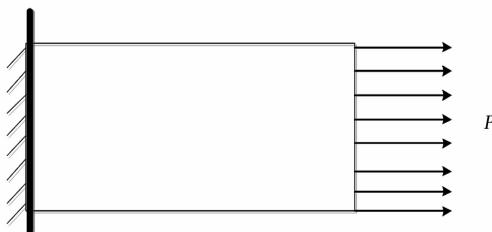


图 3 层合复合材料平板受载示意图

0.05 m, 长 0.1 m, 厚 0.125 mm。复合材料层合板的初始铺层为 32 层, 质量为 0.3356 kg, 铺层方式为 $[0_2/\pm 45/0_2/\pm 45/90_3/0_2/\pm 45/0]_s$ 。静强度值为 668 MPa, 在应力比 $R = 0.1$, 疲劳载荷 $\sigma = 80\% \sigma_b$, ($\sigma = 534$ MPa) 作用下, 疲劳寿命为 94000。

3.2 强度及疲劳寿命分析模型的验证

主要针对选用 T300/BMP-316 碳纤维树脂基复合材料, 层合板铺层数 20, 单层厚度为 0.125 mm, 铺层方式为 $[\pm 45/0_2/-45/90/0_2/45/0]_s$ 。利用理论预测模型计算其静强度和疲劳寿命值, 并将理论预测所得值与文献[2]中试验值进行对比。

表 1 T300/BMP-316 材料性能参数

弹性模量 E_1 /GPa	弹性模量 E_2 /GPa	泊松比 μ_1	剪切模量 G_{12} /GPa	密度 ρ /g·mm ⁻³	强度极限 X_t /MPa	强度极限 Y_t /MPa	强度极限 Y_c /MPa	强度极限 X_c /MPa	剪切强度极限 /MPa
128.8	8.94	0.33	5.66	1.6×10^3	1298	64	185	1040	5.66

表 2 强度预测值和实验值比较

试验破坏强度 /MPa	离散系数 /%	破坏强度均值 /MPa	本文预测值 /MPa	误差 /%
683.665				
708.474	2.25	687.78	645.5	-6.147
671.200				

表 1 为静强度预测结果与试验值对比, 静强度预测结果中, 预测误差小于 8%, 说明本文预测理论具有可行性。

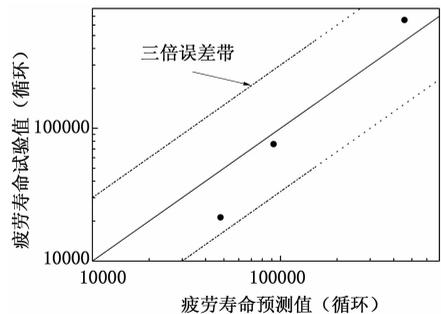


图 4 疲劳寿命预测值与实验值对比图

表 2 为疲劳寿命预测值和实验值对比表, 由图 4 可知, 所有预测值均在三倍误差代以内, 说明该模拟预测有效。

3.3 优化结果与分析

参数设置: 种群规模 50, 最大进化代数 10 初始交叉概率和变异概率分别为 0.7 和 0.008, 以 601.25 MPa (初始铺层的强度值 $\sigma = 90\% \sigma_b$) 强度值和 94000 (在应力比 $R = 0.1$, 疲劳载荷 $\sigma = 80\% \sigma_b$ 作用下求得的) 疲劳寿命值作为约束条件, 进行优化分析。并对不同约束状况下的优化结果进行对比。优化结果如表 3、4、5 所示。

材料为 T300/BMP316 复合材料层合板, 单层板宽

表 3 疲劳寿命预测值和实验值比较

载荷等级	实验寿命 均值/N	离散系数 /%	预测值 /N
80%σ _b	21 322	53.7	48 010
74%σ _b	76 034	31.6	91 980
70%σ _b	655 335	52.9	456 530

表 3 为强度单一约束优化结果，共计算了 7 代，随着进化代数增加，层数在逐渐减少，在铺层数降为 12 层时，适应度值收敛，连续三代为 2.67，优化结束。通过分析优化结果可以知道，与初始铺层相比，优化后层合板层数减少了 20 层，质量减少 0.209 kg，并且强度大于初始层合板静强度值，这表明在满足强度约束的情况下，层合板质量下降了 62.4%，优化效果明显。

表 4 为疲劳寿命单一约束优化结果，共计算了 5 代，随着进化代数的增加，层数逐渐减少，降为 12 层时，适应度值收敛为 2.67，优化结束。与初始铺层相比，层数减少 20 层，质量减少了 0.209 kg，最优铺层的疲劳寿命值为 94 200，表明满足疲劳寿命约束 94 000 的情况下，层合板质量下降了 62.4%，优化效果明显。并计算了最优铺层方式对应的强度值为 587.5 MPa。

表 4 强度单一约束优化结果

代数	层数	每一代最优铺层角度	重量 (kg)	强度值 (Mpa)	适应度
1	22	[0/±45/0 ₂ /90 ₂ /±45/0 ₂] _s	0.179	652.50	1.45
2	22	[0/±45/0 ₂ /90 ₂ /±45/0 ₂] _s	0.179	652.50	1.45
3	16	[±45/0 ₃ /90 ₂ /0] _s	0.168	677.50	2.00
4	16	[±45/0 ₃ /90/0/90] _s	0.168	643.15	2.00
5	12	[0/90/0/±45/0] _s	0.126	603.75	2.67
6	12	[0/90/0/±45/0] _s	0.126	603.75	2.67
7	12	[0/90/0/±45/0] _s	0.126	603.75	2.67

表 5 为强度和疲劳寿命双约束的优化结果，共进化 5 代，在第 3 代时开始收敛，适应度值收敛为 2.29，最优铺层为 14 层，层数减少了 18 层，质量减少了 0.1 886 kg，最优铺层的强度值 613.125 MPa 和疲劳寿命值 94 300 均大于给定约束的静强度和疲劳寿命值，其中最优铺层层数 14，与表 3 和表 4 单一约束优化结果中最优铺层层数 12 相比，层数多了 2 层，说明优化计算中强度和疲劳寿命两种约束均起到作用，在强度和疲劳寿命均满足约束条件的情况下，质量减少了 56.2%，优化效果明显。双约束条件下的最优铺层强度和疲劳寿命值均大于单强度约束所得的最优铺层强度值 603.75 MPa 和单疲劳寿命约束最优铺层的疲劳寿命值 94 200，说明双约束优化结果力学性能更优。

图 5 为三种不同约束条件下的进化代数与质量关系，强度单一约束最优质量为 0.126 kg，疲劳寿命单一约束最优铺层质量为 0.126 kg，强度和疲劳寿命双约束下最优铺层质量为 0.147 kg，可知强度和疲劳寿命双约束条件下的最

表 5 疲劳寿命单一约束优化结果

代数	铺层数	每一代最优铺层角度	重量 (kg)	疲劳寿命(N)	适应度
1	28	[0/90/0 ₄ /90/±45/90/±45/90/0] _s	0.294	1 248 00	1.14
2	18	[±45/0 ₃ /90/0 ₂ /90] _s	0.189	1 878 00	1.78
3	12	[0 ₂ /±45/0/90] _s	0.126	94 200	2.67
4	12	[0 ₂ /±45/0/90] _s	0.126	94 200	2.67
5	12	[0 ₂ /±45/0/90] _s	0.126	94 200	2.67

表 6 强度和疲劳寿命双约束优化结果

代数	铺层数	每一代最优铺层角度	重量 (kg)	强度值 (MPa)	疲劳寿命值	适应度
1	28	[0/±45/0 ₂ /90/0 ₂ /90/±45/0 ₂] _s	0.294	725.500	6 834 00	1.14
2	16	[0 ₂ /90 ₂ /±45/0 ₂] _s	0.168	692.500	1 597 00	2
3	14	[0 ₂ /90 ₂ /±45/0] _s	0.147	613.125	94 300	2.29
4	14	[0 ₂ /90 ₂ /±45/0] _s	0.147	613.125	94 300	2.29
5	14	[0 ₂ /90 ₂ /±45/0] _s	0.147	613.125	94 300	2.29

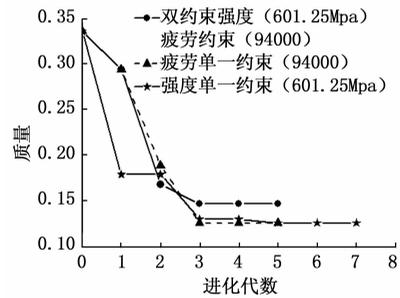


图 5 不同约束下质量随进化代数变化对比

优铺层层数要多于强度单一约束和疲劳寿命单一约束下的最优铺层数。疲劳寿命单一约束优化结果对应的铺层求得相应强度值为 587.5 MPa，与强度和疲劳寿命双约束优化结果相比强度值要低 25.625 MPa，可知双约束下求得的最优铺层力学性能更好。

4 结束语

1) 本文开展了层合复合材料强度和疲劳寿命预测方法研究，基于逐渐累积损伤分析方法，建立了碳纤维树脂基复合材料层合结构强度和疲劳寿命预测模型，对试件进行强度和疲劳寿命预测并将预测结果与试验结果对比。结果表明：试件的强度预测误差值在 8% 以内，试件的疲劳寿命预测值均在三倍误差带以内，验证了预测模型的合理性。通过对改进遗传算法和参数化有限元技术的研究，提出了考虑强度和疲劳寿命影响的复合材料层合结构优化方法。本文提出的优化方法针对层合结构铺层参数属于离散型变量优化提出了联合整数编码，为了能快速准确求出最优解提出了精英保留策略、交叉和变异自适应度策略。