

文章编号:1674-8190(2018)02-199-10

考虑层间应力的厚复合材料结构多级优化设计方法

曹华,王志瑾,原潇,韩宇,候天骄

(南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室,南京 210016)

摘要:充分发挥复合材料的利用率,降低结构重量,厚复合材料结构优化设计是非常重要的。然而优化设计空间复杂,层间应力问题突出,离散设计变量等问题使得厚复合材料结构的优化变得十分困难。针对由铺层相同的子层板叠成的厚复合材料层合板结构的复杂优化问题,本文提出一种多级优化设计方法。第一级优化采用基于径向基神经网络代理模型的优化设计方法,设计变量为子层内层数及铺层比例;第二级优化分为两个层次进行,系统层以结构重量最轻为目标,设计变量为子层数,子系统层采用遗传算法优化铺层顺序,以层间应力因子最小为目标。结合算例,通过 Matlab 编写遗传算法,并应用 Isight 集成 Matlab 来实现该优化设计方法。结果表明:本文提出的多级优化设计方法是有效的,能够很好地实现具有周期性铺层方式的厚复合材料层合板结构的优化设计。

关键词: 多级优化设计方法;厚复合材料结构;层间应力;铺层顺序;遗传算法;神经网络

中图分类号: V214.8

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.02.008

Multi-step Optimization Method of the Thick Composite Laminate Structures Considering Inter-laminar Stresses

Cao Hua, Wang Zhijin, Yuan Xiao, Han Yu, Hou Tianjiao

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To give full play to the coefficient of utilization of composite materials and reduce the structure weight, it is very important to optimize the design of thick composite structure. However, the complex design space, the inter-laminar stresses problem, and the discrete design variables make the optimization of thick composite structures very difficult. Aiming at the optimum design of thick composite structure which is formed by repeating sub-laminates, a multi-step optimization method is proposed in this paper. This method is composed of two steps. The first-step optimization design is conducted using the approximate model which is based on radial basis function neural network. The design variables include the number of plies in the sub-laminate and ply volume proportion. The second-step optimization is divided into two levels. The design variables of the system level are the number of sub-laminates, and the objective is to minimize the structural mass. The sub-system level is the optimization of laminate stacking sequence using genetic algorithm, and the objective is to minimize the inter-laminar stress factor. Matlab is adopted to program the genetic algorithm, and then integrated with Isight to carry out the whole optimization process. The case study shows that the multi-step optimization design method proposed in this paper is effective, and can achieve the optimization of thick composite laminate structure consisting of a repeating sub-laminate.

Key words: multi-step optimization design; thick composite laminate structure; inter-laminar stresses; stacking sequence; genetic algorithm; neural networks

收稿日期:2017-10-09; 修回日期:2017-12-04

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目

通信作者:曹华,caohua593@nuaa.edu.cn

0 引言

随着复合材料结构在各领域的大量使用,逐渐

由次承力结构渗透到大型主承力结构。在国外一些军用、民用飞机和卫星的纤维复合材料应用中出现了大量的厚复合材料结构,例如卫星的桁架、飞机平尾的枢轴及太阳翼连接架等结构。与复合材料薄壁结构相比,厚复合材料结构的层间应力问题更加突出,在优化设计时必须考虑层间破坏^[1]。许多学者对厚复合材料结构的层间应力分析进行了研究,并取得了显著成果。R. Byron Pipes 等^[2]应用弹性力学理论推导了有限宽度复合材料层合板在均匀轴向拉力作用下的微分方程,并通过有限差分法求得了层间应力;张培新等^[3]建立了复合材料层合板的准三维有限元模型,分析了受面内载荷的层压复合材料的层间应力;王秋宇等^[4]应用近似方法分析了梁圆角区的层间应力。总结上述层间应力的分析方法,能够发现这些方法都具有一定的局限性,只适用于简单载荷边界条件,或者只适用于简单的复合材料平板结构,不具有通用性。有限元方法因其通用性被广泛应用,商业有限元软件 Abaqus 具有强大的复合材料分析能力被广泛应用于分析厚复合材料结构的三维应力。

为了使复合材料结构在满足安全性要求的同时,复合材料的各组分材料性能能够得到最有效利用,从而最大限度的发挥复合材料的性能优势,减轻结构重量,必须进行结构优化设计。Jin Peng 等^[5]考虑强度约束、刚度约束、屈曲约束以及铺层工艺性约束,采用遗传算法对大型复合材料机翼盒段的蒙皮厚度及铺层顺序进行了优化,使结构重量减轻了 36.6%;Liu Jian 等^[6]基于径向基神经网络代理模型,应用遗传算法对复合材料卫星结构进行了尺寸优化;茅佳兵等^[7]对机翼加筋板结构进行了优化设计,从而提高了结构的承载效率;史旭东等^[8]采用遗传算法对大展弦比复合材料机翼结构进行了优化设计。上述复合材料结构优化设计的研究都是针对薄壁结构的,而针对厚复合材料结构的优化设计的研究几乎空白。与复合材料薄壁结构相比,厚复合材料结构的优化设计存在众多的难点。例如厚复合材料结构的力学分析存在难点、厚复合材料结构的优化需要考虑层间强度,而层间应力的计算存在较大的困难;厚复合材料结构的优化设计变量多,有些设计变量是离散的、不等式约束多、性能约束是设计变量的隐函数等。

工程实际应用的厚复合材料结构,为了避免由

于固化应力而引起的翘曲,通常采用很多铺层相同的子层板叠成^[9]。本文针对具有周期性铺层方式的厚复合材料层合板结构的铺层优化设计,提出一种厚复合材料层合板结构子层数、子层内层数、子层内铺层比例及铺层顺序的多级优化设计方法。结合算例,通过 Matlab 编写遗传算法,并应用 Isight 集成 Matlab 来实现该优化设计方法。

1 优化问题描述

工程实际应用的厚复合材料结构通常采用很多铺层相同的子层板叠成,这种厚复合材料结构的铺层设计参数有子层数、子层内层数、子层内铺层比例及铺层顺序。厚复合材料结构在承受较大的横向载荷时,除了产生弯曲应力外,还将产生较大的剪切应力,由此引起层间剪切应力。然而复合材料的层间强度通常很低,引起的层间剪切应力可能造成层间破坏,所以在厚复合材料结构的优化设计中,除了需考虑面内强度,还需考虑层间剪切强度。

厚复合材料结构的优化设计中设计变量为子层数、子层内层数、子层内铺层比例及铺层顺序。优化问题为寻找合适的设计变量,在满足强度要求的条件下使结构重量最轻。数学模型为

$$\begin{aligned} \text{Find:} \quad & X = (x_1, x_2, X_3, X_4)^T \\ \text{Min:} \quad & m = f(x_1, x_2, X_3, X_4) \\ \text{Subject to:} \quad & g_1(x_1, x_2, X_3, X_4) \leq 1 \\ & g_2(x_1, x_2, X_3, X_4) \leq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x_1, x_2 为厚复合材料结构的子层数、子层内层数; X_3 为子层内铺层比例, $X_3 = (N_0, N_{45})$,其中 N_0, N_{45} 分别为子层内 0° 及 45° 铺层层数,因为均衡铺层,故 -45° 的铺层层数 $N_{-45} = N_{45}$, 90° 铺层层数 $N_{90} = x_2 - N_0 - 2N_{45}$; X_4 为铺层顺序; m 为目标函数结构质量; g_1 为面内强度约束; g_2 为层间强度约束。

本文采用商业有限元软件 Abaqus 分析厚复合材料结构的三维应力,面内失效准则采用 Tsai-Hill 准则,如式(2)所示,层间失效准则如式(3)所示。

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_{xz}^2}{S_{xz}^2} + \frac{\sigma_{yz}^2}{S_{yz}^2} + \frac{\sigma_z}{Z} = 1 \quad (3)$$

式中: X, Y 和 S 为单层 X 复合材料纵向强度、横

向强度及剪切强度; Z 为层间法向强度; S_{xz} 与 S_{yz} 为层间剪切强度。

厚复合材料层合板结构还需满足一些其他工艺性要求,优化后的铺层应当满足以下铺层设计要求^[10]:①采用 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 90° 的标准铺层角;②子层板进行对称均衡铺层设计;③在子层板中, 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 90° 四种铺层角的任意角度应有大于等于 10% 的纤维;④在子层板中, 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 90° 四种铺层角的任意角度应有小于等于 60% 的纤维。

2 多级优化方法及流程

对于由铺层相同的子层板叠成的厚复合材料

结构的优化设计问题,主要的设计变量包括子层数、子层内层数、子层内铺层比例及铺层顺序。这些设计变量都是离散变量,它们之间相互影响,且对结构质量的影响不同。本文提出一种多级优化设计方法,将厚复合材料结构的复杂优化问题分解为两级优化。第一级优化是基于代理模型的优化,其目标函数为结构质量最轻,设计变量为子层内层数及铺层比例。第二级优化分为两个层次进行,系统层的设计变量为子层数,考虑面内强度及层间强度约束;子系统层采用遗传算法优化铺层顺序。总优化流程如图 1 所示。

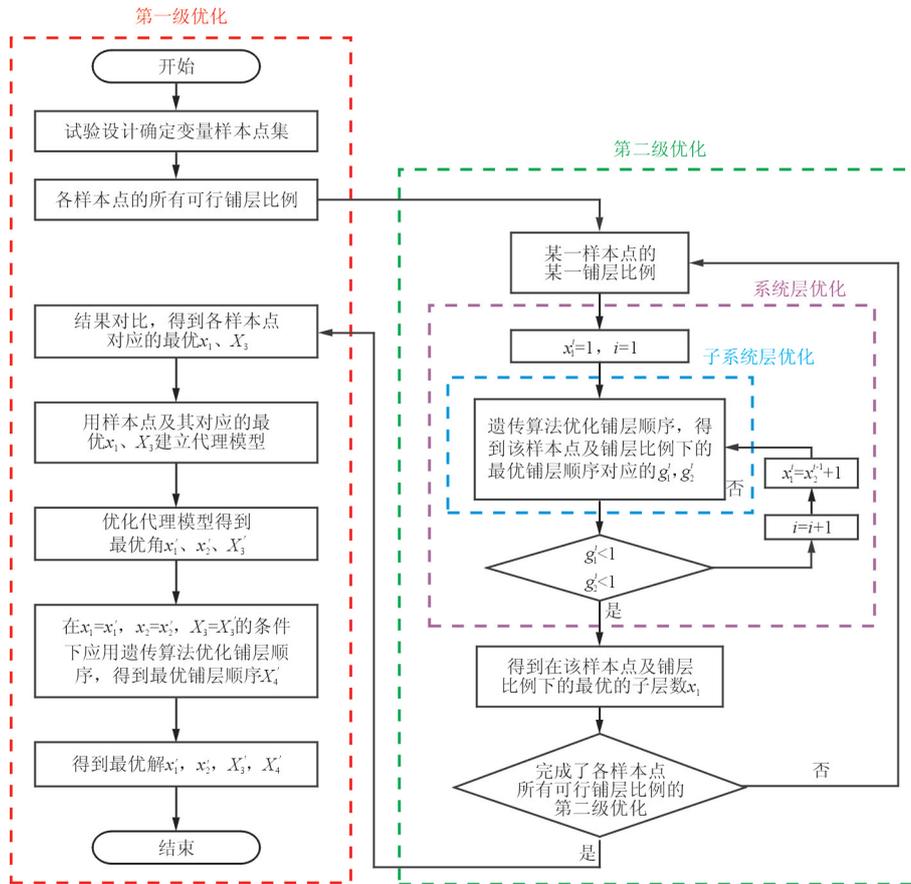


图 1 优化流程图

Fig. 1 Flow chart of optimization process

2.1 第一级优化设计

本级优化的设计变量为子层内层数与铺层比例,目标函数为结构质量。通过试验设计方法确定子层内层数的样本点集,根据铺层设计工艺性要求得到每个样本点所有可行的铺层比例。针对某个

样本点的某一可行铺层比例,采用第二级优化可以得到在该子层内层数及铺层比例下的最优子层数。每个样本点的所有可行的铺层比例都采用第二级优化进行子层数的优化,并进行结果对比,得到各样本点对应的最优铺层比例及子层数。利用样本点及其对应的最优铺层比例与子层数建立代理模

型,对代理模型进行优化得到最优解。

首先确定设计变量 x_2 的取值范围,采用试验设计方法在 x_2 的设计空间中确定样本点集。针对每个样本点,根据铺层设计要求的第(2)条、第(3)条及第(4)条确定各个样本点可行的铺层比例。以样本点 $x_2=16$ 为例,满足铺层设计要求的铺层比例如表 1 所示。

表 1 可行铺层比例($x_2=16$)

Table 1 Feasible ply volume proportion($x_2=16$)

序 号	N_0	N_{45}	$N_{-45}=N_{45}$	$N_{90}=x_2 - N_0 - 2N_{45}$
1	2	4	4	6
2	2	6	6	2
3	4	2	2	8
4	4	4	4	4
5	6	2	2	6
6	6	4	4	2
7	8	2	2	4

以 $x_2=16$ 为例,应用第二级优化方法对 x_2 为 16 时的所有可行铺层比例进行优化,即对表 1 的 7 种可行铺层比例分别进行第二级优化。每种铺层比例可以优化得到对应的最优子层数及铺层顺序。对比 7 种可行铺层比例对应的最优子层数。将 7 种可行铺层比例对应的最优子层数中最小的 x_1 及其对应的铺层比例 X_3 作为 $x_2=16$ 对应的最优子层数及铺层比例。若 7 种可行铺层比例对应的最优子层数中存在多个最小的 x_1 ,则进一步对比层间应力因子 g_2 ,将最小 g_2 对应的子层数 x_1 及铺层比例 X_3 作为 $x_2=16$ 对应的最优子层数及铺层比例。

通过第二级优化和结果对比可以得到每个样本点对应的最优铺层比例及子层数,利用这些样本点的值及对应最优铺层比例及子层数建立第一级优化系统的代理模型。该代理模型是一个三层径向基神经网络,输入层的节点个数为 1,输出层节点个数为 3;输入变量为 $x_2/2$,输出变量为 x_1 及 $X_3/2=(N_0/2, N_{45}/2)$,如图 2 所示。将所有样本点的优化结果作为训练实例,对径向基神经网络进行训练,从而得到径向基神经网络代理模型。

对径向基神经网络代理模型进行优化,得到最优解 x'_1, x'_2 和 X'_3 ,数学模型如方程(4)。在 $x_1 = x'_1, x_2 = x'_2, X_3 = X'_3$ 的条件下应用遗传算法优化铺

层顺序,得到最优铺层顺序 X'_4 ,优化流程如图 3 所示。

$$\begin{aligned} \text{Find: } & X = (x_2, X_3)^T \\ \text{Min: } & m = f(x_2, X_2) \end{aligned} \quad (4)$$

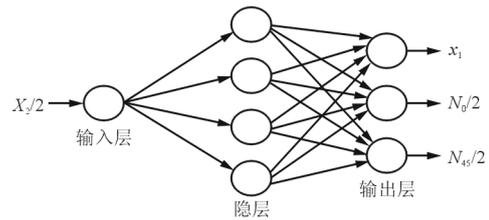


图 2 径向基神经网络模型

Fig. 2 RBF neural network model

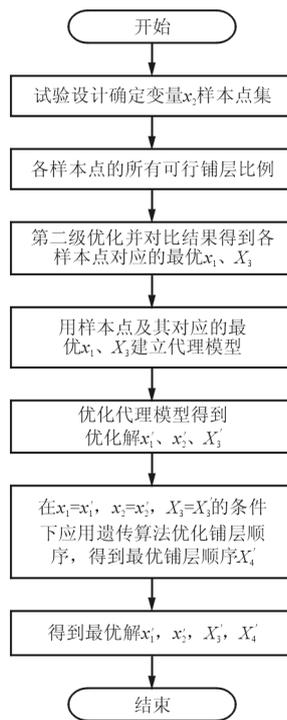


图 3 第一级优化设计流程

Fig. 3 Flow chart of the first-step optimization process

2.2 第二级优化设计

第二级优化系统是在给定子层内层数及铺层比例下优化子层数及铺层顺序。本级优化分为系统层与子系统层两个层次进行,优化流程如图 4 所示。系统层的设计变量为子层数,目标函数为质量最小,约束为层间强度及面内强度满足要求。系统层的约束函数值 g_1 与 g_2 由子系统层优化求解得到。因为目标函数结构质量与子层数成正比,系统层优化问题可描述为寻找一个最小的子层数使得

结构满足层间强度及面内强度要求。数学模型如下:

$$\begin{aligned}
 &\text{Find:} && x_1 \\
 &\text{Min:} && m = f(x_1) \\
 &\text{Subject to:} && g_1(x_1) \leq 1 \\
 &&& g_2(x_1) \leq 1
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

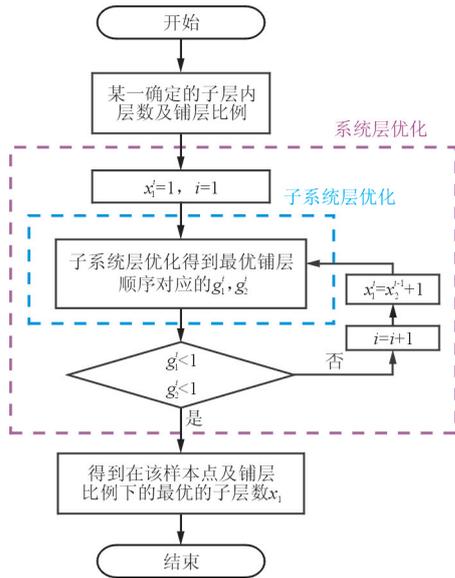


图 4 第二级优化设计流程图

Fig. 4 Flow chart of the second-step optimization process

子系统层是在给定子层内层数 $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ 的层数、子层数的情况下进行铺层顺序优化。子系统层采用遗传优化算法,设计变量为铺层顺序,目标函数为层间应力最小,约束为面内应力满足强度要求,数学模型如下:

$$\begin{aligned}
 &\text{Find:} && X_4 \\
 &\text{Min:} && g = g_2(X_4) \\
 &\text{Subject to:} && g_1(X_4) \leq 1
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

本文遗传算法采用文献[11]中的编码方法,即数字编码串的方法,要求每个个体的染色体编码中不允许有重复的基因码。选取一种初始铺层顺序,此铺层编码对应的角度则是确定的,优化后的铺层经译码后可得到相应的角度^[11-12]。

第二级优化系统的流程图如图 4 所示,系统设计变量 x_1 的初始值为其设计空间最小值 1,往大的方向寻优, x_1 的优化步长为 1。对于每个系统层设计变量 x_1 ,将子系统层优化得到的最优铺层顺序对应层间应力因子及面内应力因子作为系统层优化的约束函数值。若最优铺层顺序对应层间应力因子及面内应力因子满足系统层约束条件,则

该子层数为最优子层数,优化结束,否则子层数加 1,再进入子系统层优化,直到某一子层数下的最优铺层顺序对应层间应力因子及面内应力因子满足系统层约束条件。

3 算例

3.1 算例 1

由铺层相同的子层板叠成的复合材料圆管的外径 $D=120\text{ mm}$,长 $L=500\text{ mm}$ 。一端固支,另一端受横向载荷 $F=100\text{ kN}$,如图 5 所示。铺层材料为 ZT7H/5429,材料性能如表 2 所示,强度参数如表 3 所示,单层厚度为 0.125 mm 。该复合材料圆管由多个铺层相同的子层板堆叠而成,需要通过优化确定的参数有:子层数、子层内层数、子层内铺层比例及铺层顺序。

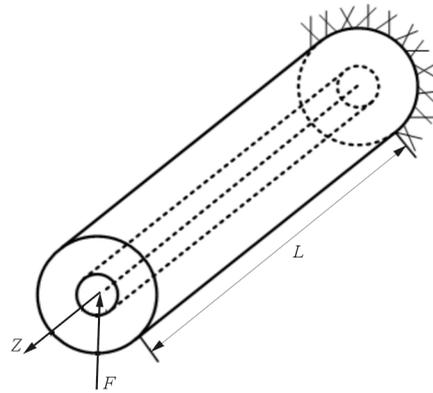


图 5 复合材料圆管模型

Fig. 5 Model of the composite pipe

表 2 ZT7H/5429 的工程弹性常数

Table 2 Engineering constants for ZT7H/5429

弹性常数	数值	弹性常数	数值
E_1/GPa	130.1	E_{13}/GPa	5.45
E_2/GPa	10.4	μ_{12}	0.269
E_3/GPa	10.4	μ_{23}	0.269
E_{12}/GPa	5.45	μ_{13}	0.269
E_{23}/GPa	4.098		

表 3 ZT7H/5429 强度参数

Table 3 Strength parameters for ZT7H/5429

强度参数	数值	强度参数	数值
X/MPa	1760.00	Z/MPa	35.31
Y/MPa	151.60	S_{13}/MPa	46.42
S_{12}/MPa	84.40	S_{23}/MPa	46.42

子层采用对称铺层,子层内层数 x_2 的取值范围为 10~30 的偶数,采用试验设计方法确定 x_2 的样本点集为 {10,16,20,22,26,30},并根据铺层工艺要求列出所有可行的铺层比例。对各个样本点应用 Abaqus 二次开发语言 Python 实现参数化建模,用 Matlab 语言编写遗传算法,根据图 4 所示的

优化流程,应用 Isight 集成 Matlab 实现该优化方法。

以 $x_2=16$ 为例,子层内层数 $x_2=16$ 对应的所有可行铺层比例如表 1 所示,分别对这些铺层比例进行第二级优化,优化结果如表 4 所示。

表 4 各可行铺层比例对应的最优解($x_2=16$)

Table 4 Optimal solution for each feasible ply volume proportions($x_2=16$)

N_0	N_{45}	子层数	最优铺层顺序	g_1	g_2	总层数
2	4	22	$[-45/45/45/90/90/-45/90/0]_s$	0.672	0.990	352
2	6	29	$[-45/45/45/-45/45/-45/90/0]_s$	0.589	0.996	464
4	2	8	$[-45/90/45/90/90/90/0/0]_s$	0.934	0.995	128
4	4	10	$[-45/45/45/-45/90/90/0/0]_s$	0.617	0.999	160
6	2	6	$[-45/45/90/90/0/0/0/90]_s$	0.812	0.910	96
6	4	8	$[-45/45/45/-45/90/0/0/0]_s$	0.529	0.949	128
8	2	4	$[90/90/0/0/-45/0/0/45]_s$	0.875	0.975	64

从表 4 可以看出:子层内铺层比例对总层数(质量)的影响很大,当子层内铺层比例为 $N_0=2, N_{45}=N_{-45}=6, N_{90}=2$ 时,子层数达到 29,总层数为 464,而子层内铺层比例为 $N_0=8, N_{45}=N_{-45}=2, N_{90}=4$ 时,子层数为 4,总层数为 64;对比表 4 中子层数,得到 $x_2=16$ 对应的最优铺层比例 $X_3=(8,2)$,最优子层数 $x_1=4$ 。

子层内层数 $x_2=16$,子层内 $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ 铺层比例为 6:4:2 时的子层数的优化结果曲线如图 6 所示。

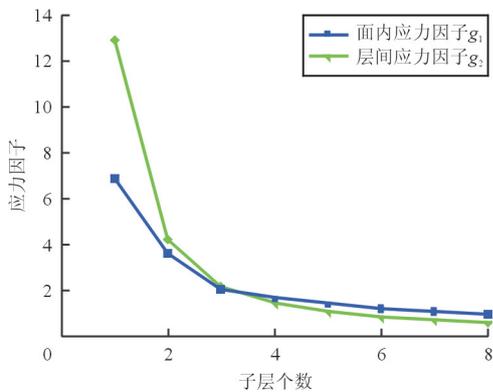


图 6 第二级系统层优化过程
Fig. 6 Second-step system level

从图 6 可以看出: g_1 和 g_2 都随着子层数的增加而减小,且随着子层数的增加 g_1 和 g_2 的斜率减小;子层数较大时 $g_2 > g_1$,层间应力因子 g_2 起临

界约束作用,表明厚复合材料层合板结构的层间破坏比面内破坏先发生,在厚复合材料结构的设计中必须考虑层间强度。

子层内层数 $x_2=30$,子层内 $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ 铺层比例为 10:6:8,子层数 $x_1=3$ 时的铺层顺序优化结果曲线如图 7 所示。

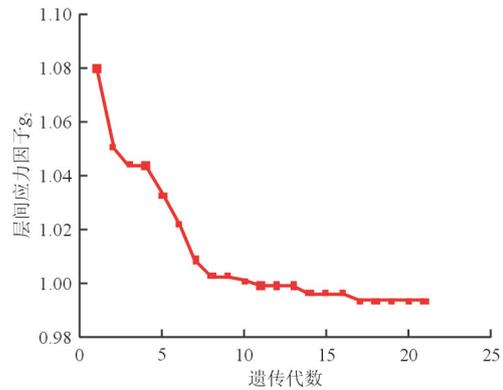


图 7 最优层间应力因子进化过程
Fig. 7 Evolution process of optimal inter-laminar stress factor

从图 7 可以看出:遗传优化算法是收敛的,通过遗传优化能够高效的寻找到最优的铺层顺序,从而改进层间应力因子。

分别对各样本点的所有可行铺层比例进行优化并对比结果,得到各个样本点对应的对应最优铺层比例及子层数,如表 5 所示。

表 5 各样本点对应的最优解
Table 5 Optimal solution for each sample point

x_2	N_0	N_{45}	铺层顺序	x_1	g_1	g_2
10	4	2	$[-45/45/0/0/90]_s$	10	0.644	0.946
16	8	2	$[90/90/0/0/-45/0/0/45]_s$	4	0.875	0.975
20	12	2	$[0/0/-45/0/45/0/0/90/0/90]_s$	3	0.794	0.937
22	10	4	$[90/90/-45/0/45/0/0/0/45/0/-45]_s$	3	0.989	0.968
26	14	4	$[90/-45/0/0/45/45/0/0/90/0/0/-45/0]_s$	3	0.621	0.821
30	18	4	$[90/45/0/0/0/-45/0/0/0/90/0/-45/0/0/45]_s$	3	0.449	0.712

利用样本点及其对应的最优铺层比例与子层数建立径向基神经网络代理模型,在建立代理模型时,以设计变量 x_2 的所有样本点及其对应最优铺层比例及子层数为训练实例,即用表 5 中的数据进行训练。该代理模型是一个三层径向基神经网络,

输入层的节点个数为 1,输入变量为 $x_2/2$,输出节点个数为 3,输出变量分别为 x_1 、 $N_0/2$ 及 $N_{45}/2$ 。用训练后的代理模型计算所有 $x_2/2$ 值的 x_1 、 $N_0/2$ 及 $N_{45}/2$,并将径向基代理模型输出结果进行四舍五入得到实际结果,如表 6 所示。

表 6 RBF 输出和实际输出结果
Table 6 RBF output and actual output results

RBF 输入		RBF 输出结果			实际结果			总层数
$x_2/2$	$N_0/2$	$N_{45}/2$	x_1	$N_0/2$	$N_{45}/2$	x_1	$x_1 \cdot x_2$	
5	2.00	1.00	10.00	2	1	10	100	
6	3.48	1.22	7.49	3	1	7	84	
7	4.39	1.30	4.62	4	1	5	70	
8	4.00	1.00	4.00	4	1	4	64	
9	5.39	0.74	3.76	5	1	4	72	
10	6.00	1.00	3.00	6	1	3	60	
11	5.00	2.00	3.00	5	2	3	66	
12	5.60	2.27	3.03	6	2	3	72	
13	7.00	2.00	3.00	7	2	3	78	
14	8.25	1.95	2.99	8	2	3	84	
15	9.00	2.00	3.00	9	2	3	90	

从表 6 可以看出: $x_2 = 20, N_0 = 12, N_{45} = 2, x_1 = 3$ 时,总层数最少,厚复合材料圆管结构质量最小。

对 $x_2 = 20, N_0 = 12, N_{45} = 2, x_1 = 3$ 时进行铺层顺序优化,得出最优铺层顺序为 $[0/0/-45/0/45/0/0/90/0/90]_s$ 。确定该复合材料圆管最优尺寸及铺层为:壁厚 7.5 mm,内径为 105 mm,子层数为 3,子层铺层方式为 $[0/0/-45/0/45/0/0/90/0/90]_s$ 。

3.2 算例 2

由铺层相同的子层板叠成的厚复合材料矩形板的尺寸如图 8 所示,受三点弯曲,横向载荷为 q 。该厚复合材料矩形板的单层板厚度及力学性能同算例 1。该板的初始厚度 $H = 15$ mm,子层数为 6,各子层板的铺层方式为 $[0/0/45/-45/0/45/-45/0/90/0]_s$,载荷 $q = 667$ N/mm。该板使用式(2)和式(3)的强度准则,面内应力因子 $g_1 = 0.35$,层间

应力因子 $g_2 = 1.00$, 刚好发生层间破坏。为了减轻结构重量, 对该板进行优化, 设计变量包括: 子层数、子层内层数、子层内铺层比例及铺层顺序。

子层采用对称铺层, 子层内层数 x_2 的取值范围为 10~30 的偶数, 采用试验设计方法, 确定 x_2 的样本点集为 {10, 16, 18, 22, 26, 30}, 并根据铺层工艺要求列出所有可行的铺层比例。

以 $x_2 = 16$ 为例, 子层内层数 $x_2 = 16$ 对应的所有可行铺层比例如表 1, 分别对这些铺层比例进行第二级优化, 优化结果如表 7 所示。

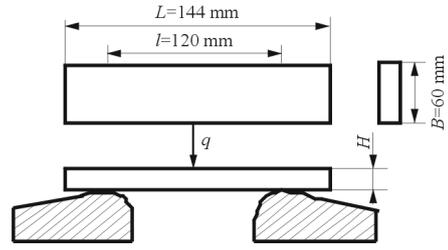


图 8 三点弯曲

Fig. 8 Thick composite rectangular plate subjected to three-point bending

表 7 $x_2 = 16$ 且 $X_3 = (6, 4)$ 时的第二级系统层优化结果

Table 7 System level optimization results in the second step when $x_2 = 16$ and $X_3 = (6, 4)$

N_0	N_{45}	子层数	最优铺层顺序	g_1	g_2	总层数
2	4	9	$[90/-45/90/-45/45/45/90/0]_s$	0.604	0.819	144
2	6	10	$[-45/90/-45/45/-45/45/45/0]_s$	0.468	0.821	160
4	2	8	$[90/90/-45/90/90/45/0/0]_s$	0.558	0.809	128
4	4	9	$[90/-45/-45/90/45/45/0/0]_s$	0.338	0.734	144
6	2	8	$[0/0/90/0/90/90/-45/45]_s$	0.283	0.753	128
6	4	8	$[0/0/0/90/-45/45/45/-45]_s$	0.323	0.969	128
8	2	7	$[0/0/90/0/0/-45/90/45]_s$	0.326	0.950	112

从表 7 可以看出: 子层内铺层比例对总层数 (质量) 的影响很大, 当子层内铺层比例为 $N_0 = 2, N_{45} = N_{-45} = 6, N_{90} = 2$ 时, 子层数达到 10, 总层数为 160, 而子层内铺层比例为 $N_0 = 8, N_{45} = N_{-45} = 2, N_{90} = 4$ 时, 子层数为 7, 总层数为 112。对比表 7 中子层数, 得到 $x_2 = 16$ 对应的最优铺层比例 $X_3 = (8, 2)$, 最优子层数 $x_1 = 7$ 。

子层内层数 $x_2 = 16$, 子层内 $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ 铺层比例为 6 : 4 : 2 时的子层数的优化结果曲线如图 9 所示。

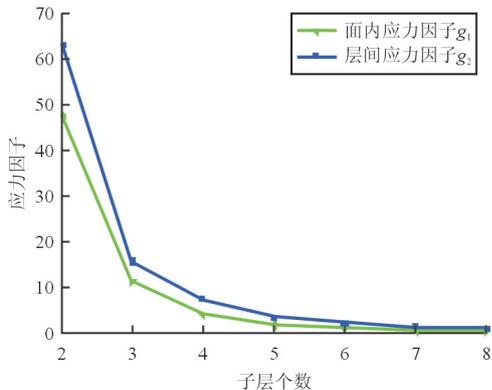


图 9 第二级系统层优化过程

Fig. 9 Second-step system level

从图 9 可以看出: g_1 和 g_2 都随着子层数的增加而减小, 且随着子层数的增加 g_1 和 g_2 的斜率减小; 层间应力因子起临界约束作用, 表明厚复合材料层合板结构的层间破坏比面内破坏先发生, 在厚复合材料结构的设计中必须考虑层间强度。

子层内层数 $x_2 = 28$, 子层内 $0^\circ, \pm 45^\circ$ 和 90° 铺层比例为 16 : 4 : 4, 子层数 $x_1 = 4$ 时的铺层顺序优化结果曲线如图 10 所示。

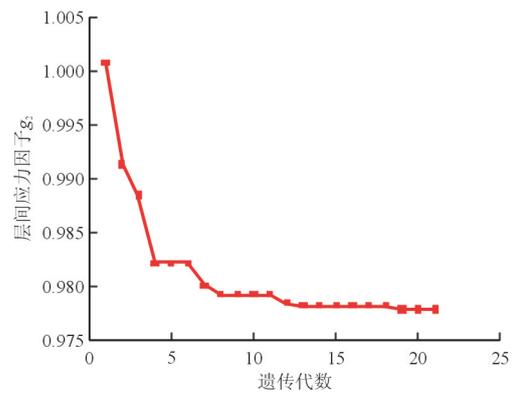


图 10 最优层间应力因子进化过程

Fig. 10 Evolution process of optimal inter-laminar stress factor

从图 10 可以看出:遗传优化算法是收敛的,通过遗传优化能够高效的寻找到最优的铺层顺序,从而改进层间应力因子。

分别对各样本点的所有可行铺层比例进行优化并对比结果,得出各个样本点对应的对应最优铺层比例及子层数,如表 8 所示。

表 8 各样本点对应的最优铺层比例及子层数

Table 8 Optimal ply volume proportion and number of sub-laminates for each sample point

x_2	N_0	N_{45}	铺层顺序	子层数 x_1	g_1	g_2
10	4	2	[90/-45/45/0/0]s	12	0.414	0.996
16	8	2	[0/0/90/0/0/-45/90/45]s	7	0.326	0.950
18	10	2	[0/0/0/90/0/0/90/-45/45]s	7	0.163	0.690
22	10	4	[45/0/0/45/0/0/0/-45/90/90/-45]s	6	0.289	0.726
26	14	4	[0/0/0/0/90/0/90/0/0/-45/-45/45/0/45]s	5	0.140	0.674
30	18	4	[0/0/0/0/45/0/0/0/90/90/0/0/45/-45/-45]s	4	0.209	0.818

同理,利用样本点及其对应的最优铺层比例与子层数建立径向基神经网络代理模型。使用训练后的代理模型计算所有 $x_2/2$ 值的 x_1 、 $N_0/2$ 及

$N_{45}/2$,并将径向基代理模型输出结果进行四舍五入得出实际结果,如表 9 所示。

表 9 RBF 输出和实际输出结果

Table 9 RBF output and actual output results

RBF 输入		RBF 输出结果			实际结果			总层数
$x_2/2$	$N_0/2$	$N_{45}/2$	x_1	$N_0/2$	$N_{45}/2$	x_1	$x_1 \cdot x_2$	
5	2.000	1.000	12.000	2	1	12	120	
6	2.819	1.329	9.784	3	1	10	120	
7	3.575	1.445	8.729	4	1	9	126	
8	4.000	1.000	7.000	4	1	7	112	
9	5.000	1.000	7.000	5	1	7	126	
10	5.166	1.589	6.490	5	2	6	120	
11	5.000	2.00	6.000	5	2	6	132	
12	5.766	2.049	5.536	6	2	6	144	
13	7.000	2.000	5.000	7	2	5	130	
14	8.269	1.990	4.382	8	2	4	112	
15	9.000	2.000	4.000	9	2	4	120	

从表 9 可以看出:当 $x_2 = 16, N_0 = 8, N_{45} = 2, x_1 = 7$ (第一组)和 $x_2 = 28, N_0 = 16, N_{45} = 4, x_1 = 4$ (第二组)时,总层数同时达到最小值 112,该板质量最小。

再对这两组厚板进行铺层顺序优化,得出:第一组的最优铺层顺序为 [0/0/90/0/0/-45/90/45]s,对应的 $g_1 = 0.326, g_2 = 0.950$;第二组的最优铺层顺序为 [45/0/0/0/0/45/0/0/90/0/-45/0/90/-45]s,对应的 $g_1 = 0.395, g_2 = 0.986$,可以看出第一组的 g_2 小于第二组的 g_2 ,故该板的最优解为 $x_2 = 16, N_0 = 8, N_{45} = 2, x_1 = 7$ (第一组),铺层顺

序为 [0/0/90/0/0/-45/90/45]s。与初始设计的子层铺层方式 [0/0/45/-45/0/45/-45/0/90/0]s,子层数为 6 相比,结构质量减小 6.67%,表明该优化算法是有效的。

4 结 论

(1) 本文针对具有周期性铺层方式的厚复合材料层合板结构的子层数、子层内层数、子层内铺层比例及铺层顺序的优化设计提出了一种多级优化设计方法。在优化设计过程中,考虑了面内强度及层间强度约束,使优化后的厚复合材料结构在设

计载荷作用下不发生层间破坏。多级优化设计方法将厚复合材料层合板的复杂优化问题分解为多个层次进行优化,从而将具有不同量纲、对结构影响程度不同的设计变量分离,实现了厚复合材料结构的优化设计。

(2) 通过算例表明了本文提出的优化方法的有效性,能够很好地实现具有周期性铺层方式的厚复合材料层合板结构的优化设计。该优化方法为厚复合材料结构的初始设计提供了思路,具有重要的工程实用价值。

参考文献

- [1] 陈烈民, 杨宝宁. 复合材料的力学分析[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 147-152.
Chen Liemin, Yang Baoning. Mechanical analysis for composite materials[M]. Beijing: Science and technology of China Press, 2006: 147-152. (in Chinese)
- [2] R Byron Pipes, Pagano N J. Interlaminar stresses in composite laminates under uniform axial extension[J]. Journal of Composite Materials, 1970, 34(4): 538-548.
- [3] 张培新, 李亚智. 受面内载荷的层压复合材料的层间应力分析[J]. 机械强度, 2006, 28(2): 224-228.
Zhang Peixin, Li Yazhi. Interlaminar stress analysis of composite laminates subjected to in-plane loading[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(2): 224-228. (in Chinese)
- [4] 王秋宇, 陈普会, 王爱军. 复合材料梁圆角区层间应力计算方法[J]. 江苏航空, 2014 (1): 18-20.
Wang Qiuyu, Chen Puhui, Wang Aijun. Calculation and analysis method of interlaminar stress in the fillet area of composite beam[J]. Jiangsu Aviation, 2014 (1): 18-20. (in Chinese)
- [5] Peng Jin, Bifeng Song, Xiaoping Zhong. Structure optimization of large composite wing box with parallel genetic algorithm[J]. Journal of Aircraft, 2012, 48(6): 2145-2148.
- [6] Liu Jian, Teng Long, Renhe Shi, et al. Composite structure optimization for satellite using discrete dynamic radial basis function metamodel[C]. 17th AIAA/ISSMO Multi-disciplinary Analysis and Optimization Conference, 2016.
- [7] 茅佳兵, 王生楠, 刘俭辉. 机翼复合材料加筋壁板结构的优化设计[J]. 航空工程进展, 2014, 5(3): 390-396.
Mao Jiabing, Wang Shengnan, Liu Jianhui. Optimization design for stiffened composite wing panel[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(3): 390-396. (in Chinese)
- [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.
Shi Xudong, Chen Liang, Zhang Bihui, et al. Structural optimization design of high aspect ratio composite wing based on genetic algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(1): 110-115. (in Chinese)
- [9] 罗祖道, 李思简. 各向异性材料力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1994: 355-362.
Luo Zudao, Li Sijian. Anisotropic material mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1994: 355-362. (in Chinese)
- [10] Kassapoglou C. Design and analysis of composite structures with applications to aerospace structures[M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2013: 343-345.
- [11] 修英妹, 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.
Xiu Yingmei, Cui Degang. Ply optimization design for stability of composite laminates[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 212-216. (in Chinese)
- [12] 常楠, 杨伟, 王伟. 基于复合材料层合板稳定性的铺层参数优化设计方法[J]. 机械强度, 2008, 30(1): 148-151.
Chang Nan, Yang Wei, Wang Wei. New method of ply optimization design for stability of composite laminates[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(1): 148-151. (in Chinese)

作者简介:

曹华(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构优化设计。

王志瑾(1963—),女,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构设计。

原潇(1992—),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行器结构设计。

韩宇(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器结构设计。

侯天骄(1993—),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行器结构设计。

(编辑:赵毓梅)