

# 复合材料加筋板结构的并行空间协同优化设计方法

冯玉龙<sup>1,2</sup> 程家林<sup>2</sup> 姚卫星<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司技术中心, 成都, 610092)

**摘要:**提出了使用并行子空间协同优化设计方法对复合材料加筋板结构的布局参数和铺层顺序进行协同优化。该方法分为 3 步:(1)以筋条型式、数量、尺寸和铺层厚度为变量,考虑静强度和稳定性要求,建立 3 个并行的子优化问题,实现了布局优化;(2)以层合板的各铺层角作为设计变量,考虑层合板的制造和工艺约束,以等效弯曲刚度为中间变量,实现了复合材料加筋板的蒙皮和筋条的铺层顺序优化;(3)通过协调稳定性约束,实现综合优化。本文完成了一个典型算例,算例结果表明,该方法不仅合理而且有很好的优化效果。

**关键词:**复合材料;加筋板;布局优化;并行子空间优化方法;等效弯曲刚度;铺层顺序优化

**中图分类号:**TB323      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2013)03-0360-07

## Concurrent Subspace Optimum Design Method for Composite Stiffened Panel

Feng Yulong<sup>1,2</sup>, Cheng Jialin<sup>2</sup>, Yao Weixing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. R & D Center, Chengdu Aircraft Industrial(Group) Co. Ltd., Chengdu, 610092, China)

**Abstract:** A concurrent subspace optimum design method for composite stiffened panel is proposed. The optimum design process is decomposed into three steps. Firstly, the shape, number and size of the ribs are set as variables to deal with layout optimization through constructing three sub-optimization systems in consideration of the static strength and stability requirements. Then, the stacking sequence of the laminates is set as variable to deal with ply stacking sequence optimization of the skin and ribs in consideration of manufacturing and process constraints. The equivalent bending stiffness is set as intermediate variable. Finally, to determine the optimal composite stiffened panel, two optimization results are collaboratively optimized. The optimization design of a composite stiffened panel under compressive and shear loading is conducted to demonstrate the effectiveness.

**Key words:** composite material; stiffened panel; layout optimization; concurrent subspace optimization; equivalent bending stiffness; ply stacking sequence optimization

加筋板结构承载能力强、重量轻,在航空航天结构中被广泛使用,随着复合材料日益广泛的使用,复合材料加筋板的结构布局优化设计对减轻飞机重量具有很重要的意义。

复合材料加筋板结构优化设计的设计变量较多,不仅有连续变量,还有离散变量,且变量之间相互耦合,优化设计的难度较大。传统的数学规划法或准则法很难解决这类问题。近年来,国内外的研

**基金项目:**国家自然科学基金(11202098)资助项目;教育部长江学者创新团队基金(IRT0968)资助项目。

**收稿日期:**2013-01-15;**修订日期:**2013-03-04

**通信作者:**姚卫星,男,教授,博士生导师,1957 年出生,E-mail: wxiao@nuaa.edu.cn。

究者对此开展了广泛的研究。刘克龙等人<sup>[1]</sup>在对机翼的气动结构进行多学科优化设计的时候运用了低自由度协同优化方法。Blair 等人<sup>[2]</sup>将快速建模方法应用于翼面结构的布局优化设计。针对加筋板的布局优化设计,张铁亮等人<sup>[3]</sup>采用了试验设计建立代理模型的方法。Nagendra 等人<sup>[4]</sup>应用改进的遗传算法对加筋板结构进行优化设计。Fate-mi<sup>[5]</sup>和 Kang 等人<sup>[6]</sup>也在加筋板结构设计优化中用到了遗传算法。Lanzi 等人<sup>[7]</sup>利用神经网络对复合材料加筋板进行优化。李烁等人<sup>[8]</sup>应用神经网络对复合材料帽型加筋板进行优化。Berke 等人<sup>[9]</sup>利用了人工神经网络优化飞机翼面的结构布局。Rikards 等人<sup>[10]</sup>将代理模型技术应用到了加筋板结构设计优化中。赵群等人<sup>[11]</sup>提出了基于压弯刚度复合材料加筋板的布局优化设计方法。乔巍等人<sup>[12]</sup>采用等效弯曲刚度法实现了铺层顺序的优化。吴莉莉等人<sup>[13]</sup>提出了加筋板稳定性约束下的二级协同优化算法。

本文提出了一种并行子空间协同优化方法,用于减小整个优化问题的求解规模,实现了布局、尺寸和铺层顺序的综合优化设计。

### 1 优化问题

对复合材料加筋板结构的优化设计主要是对筋条布局型式、筋条截面尺寸设和层合板铺层顺序进行优化。约束条件包括静强度约束和稳定性约束。优化目标为重量最轻。优化模型如下

$$\begin{aligned} \min \quad & W(\mathbf{X}) \\ \text{s. t.} \quad & \lambda(\mathbf{X}) \geq \lambda^* \\ & \sigma(\mathbf{X}) \leq [\sigma] \\ & \varepsilon(\mathbf{X}) \leq [\varepsilon] \\ & \mathbf{X}_L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}_U \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}$  为所有的设计变量,包括筋条截面形状、筋条位置、筋条截面尺寸和层合板铺层顺序; $\mathbf{X}_L$  和  $\mathbf{X}_U$  分别为  $\mathbf{X}$  的下限值和上限值; $W(\mathbf{X})$  为加筋板的结构重量; $\lambda(\mathbf{X})$  为结构的屈曲因子; $\lambda^*$  为屈曲因子设计值; $[\sigma]$  和  $[\varepsilon]$  为材料的许用应力和许用应变。

### 2 并行子空间协同优化方法

本文提出的并行协同优化方法包括布局优化、铺层顺序优化以及协同综合 3 个步骤。

### 2.1 布局优化

在布局优化过程中,设计变量包括:筋条截面形状  $S$ 、筋条数量  $N$ 、筋条水平缘条宽度  $b_w$ 、筋条垂直缘条宽度  $b_f$  以及层合板的铺层厚度  $T$ 。优化模型如下

$$\begin{aligned} \min \quad & W(\mathbf{X}) \\ \text{s. t.} \quad & \lambda(\mathbf{X}) \geq \lambda^* \\ & \sigma_i(\mathbf{X}) \leq [\sigma_i] \\ & \varepsilon_i(\mathbf{X}) \leq [\varepsilon_i] \\ & \mathbf{X}_L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}_U \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}=(S, N, b_w, b_f, T)$ ; $\mathbf{X}_L$  和  $\mathbf{X}_U$  为  $\mathbf{X}$  中所有变量的下限值和上限值; $W(\mathbf{X})$  为加筋板结构重量; $\lambda(x_i)$  为结构屈曲因子; $\lambda^*$  为屈曲因子设计值,  $[\sigma_i]$  和  $[\varepsilon_i]$  为材料的许用应力和许用应变,其中  $i=1, 2, 12$  分别表示纵向、横向和面内剪切方向。

将复合材料加筋板布局优化问题分为筋条布置、筋条尺寸和铺层厚度 3 个子问题,相应地将设计变量也对应地分为 3 类,3 个子问题在各自的子空间里优化。布局优化流程如图 1 所示。

图 1 中, $L_L$  和  $L_U$  为筋条布局变量  $L$  的下限值和上限值; $B_L$  和  $B_U$  为筋条尺寸变量  $B$  的下限值和上限值; $T_L$  和  $T_U$  为铺层厚度变量  $T$  的下限值和

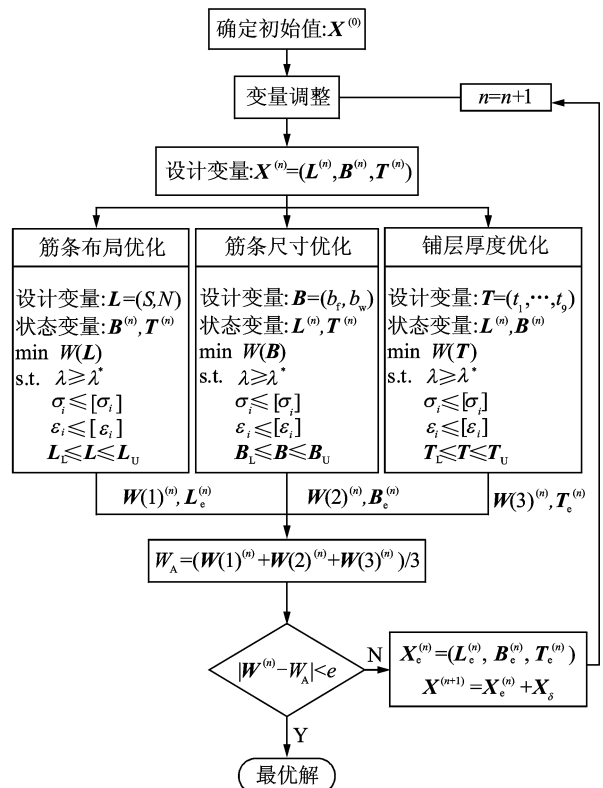


图 1 布局优化流程

上限值;  $\mathbf{X}^{(n)}$  为第  $n$  次迭代过程的变量值;  $W$  为结构重量;  $\lambda$  为结构屈曲因子,  $\lambda^*$  为临界屈曲因子;  $[\sigma_i]$  和  $[\varepsilon_i]$  与式(2)中一样;  $\mathbf{L}_e^{(n)}$ ,  $\mathbf{B}_e^{(n)}$  和  $\mathbf{T}_e^{(n)}$  表示并行优化后的变量值;  $\mathbf{W}^{(n)}$  为一个向量, 包含 3 个子优化问题优化后的结构重量;  $e$  为收敛精度;  $\mathbf{X}_\delta$  表示变量的改变量。

### 2.1.1 筋条布局优化

筋条布局优化的设计变量是筋条的截面形状和筋条数量。图 2 中给出了 6 种筋条截面形状及其尺寸规定。本文只考虑筋条沿宽度方向均匀铺设的加筋板结构, 因此筋条的位置由筋条数量决定。由于组合数目不大, 且是离散变量, 所以筋条布局优化的优化方法是枚举法, 直接计算整个变量空间的组合情况, 对所有变量组合的有限元模型进行分析计算。在所有满足约束条件的计算结果中, 取重量最小的结果为最优解。

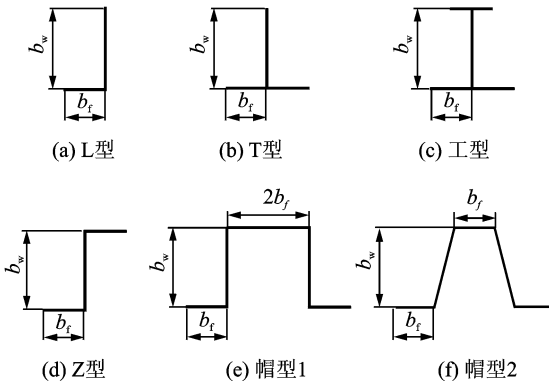


图 2 筋条截面形状

### 2.1.2 筋条尺寸优化

筋条的截面尺寸定义如图 2 所示。筋条尺寸优化设计首先使用随机拉丁超立方实验设计法生成变量  $b_f$  和  $b_w$  的样本点, 然后对所有的样本点建立有限元模型分析计算。根据样本点和计算结果建立 Kriging 代理模型。用多岛遗传算法对代理模型寻优, 并对寻优结果建立有限元模型验证。如果该结果不满足精度要求则将其作为新的试验点更新代理模型, 然后重复寻优过程直到找到最优结果。优化流程如图 3 所示。

图 3 中,  $W^*$  为优化代理模型得到的结构重量,  $W$  为建立有限元模型验证后的真实结构重量,  $e_1$  为收敛精度。

### 2.1.3 铺层厚度优化

在整个布局优化过程中, 加筋板蒙皮铺层为  $[45_{t_1}/0_{t_2}/-45_{t_1}/90_{t_3}]_s$ , 筋条水平缘条铺层为

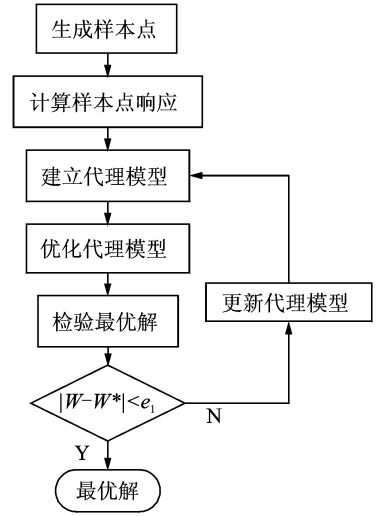


图 3 尺寸优化设计流程

$[45_{t_4}/0_{t_5}/-45_{t_4}/90_{t_6}]_s$ , 筋条垂直缘条铺层为  $[45_{t_7}/0_{t_8}/-45_{t_7}/90_{t_9}]_s$ 。整个加筋板结构铺层厚度变量  $\mathbf{T} = (t_1, \dots, t_9)$ 。铺层厚度优化可以直接在 PATRAN 软件中建立优化模型进行计算。

### 2.1.4 子空间优化协调

一轮优化结束后若 3 个最优重量的方差满足精度要求则取重量最轻的结果作为最优解输出, 否则更新状态变量, 进行循环计算。图 1 中的变量改变量  $\mathbf{X}_\delta = (\mathbf{L}_\delta, \mathbf{B}_\delta, \mathbf{T}_\delta)$ , 定义如下

$$\begin{cases} \mathbf{L}_\delta = \mathbf{H}(1) \times (\mathbf{L}^{(n)} - \mathbf{L}_e^{(n)}) \\ \mathbf{B}_\delta = \mathbf{H}(2) \times (\mathbf{B}^{(n)} - \mathbf{B}_e^{(n)}) \\ \mathbf{T}_\delta = \mathbf{H}(3) \times (\mathbf{T}^{(n)} - \mathbf{T}_e^{(n)}) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\mathbf{H}$  为步长, 通过多个算例的探索, 建议

$$\mathbf{H}(i) = \begin{cases} -0.4 & \mathbf{W}_\Delta(i) < -0.4 \\ 0.4 & \mathbf{W}_\Delta(i) > 0.4 \quad (i=1, 2, 3) \\ \mathbf{W}_\Delta(i) & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\mathbf{W}_\Delta = \mathbf{W}_A - \mathbf{W}^{(n)}$ 。

因为筋条数量和筋条水平缘条宽度受到几何空间的限制, 其变化范围较小, 所以在优化过程中可能会出现没有可行解的情况。因此需要在每一次循环迭代之前对变量进行检查或调整。

变量调整过程是在每一次的布局优化设计中完成的。筋条布局优化是采用枚举法计算所有变量组合的结构重量和约束响应, 如果计算结果中有满足约束要求的样本点则继续下一步流程, 否则将筋条尺寸变量和铺层厚度变量做如下调整

$$\begin{cases} \mathbf{B}^{(n)} = \mathbf{B}^{(n)} \times p \\ \mathbf{T}^{(n)} = \mathbf{T}^{(n)} \times q \end{cases} \quad (5)$$

式中参数  $p, q$  为

$$\begin{cases} p=1.2, & q=2 & \lambda^*/\lambda_m > 2 \\ p=1.1, & q=\lambda^*/\lambda_m & 1 < \lambda^*/\lambda_m < 2 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\lambda^*$  为临界屈曲因子;  $\lambda_m$  为所有计算结果中的最大屈曲因子。

### 2.2 铺层顺序优化

本文分析的层合板结构都是对称均衡铺设的。其耦合刚度矩阵  $\mathbf{B}=\mathbf{0}$ , 弯曲刚度矩阵  $\mathbf{D}$  不仅与铺层角、铺层百分比有关, 还与铺层顺序有关, 可表示如下

$$\begin{cases} D_{11} = U_1 W_0 + U_2 W_1 + U_3 W_2 \\ D_{12} = U_4 W_0 - U_3 W_2 \\ D_{16} = \frac{1}{2} U_2 W_3 + U_3 W_4 \\ D_{22} = U_1 W_0 - U_2 W_1 + U_3 W_2 \\ D_{26} = \frac{1}{2} U_2 W_3 - U_3 W_4 \\ D_{66} = U_3 W_0 - U_3 W_2 \end{cases} \quad (7)$$

为了便于使用, 无量纲化的弯曲刚度参数  $W_0^*, W_1^*, W_2^*, W_3^*$  及  $W_4^*$  表示为

$$\begin{bmatrix} W_0^* \\ W_1^* \\ W_2^* \\ W_3^* \\ W_4^* \end{bmatrix} = \frac{12}{t_{all}^3} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} z^2 \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\theta_z \\ \cos 4\theta_z \\ \sin 2\theta_z \\ \sin 4\theta_z \end{bmatrix} dz \quad (8)$$

式中:  $t_{all}$  为层合板总厚度。本文的层合板铺层角度是采用  $0^\circ, \pm 45^\circ$  和  $90^\circ$  这 4 种标准铺层方向, 所以这些无量纲参数应满足以下条件<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} W_0^* \equiv 1, & W_4^* \equiv 0 \\ -1 \leq W_1^*, & W_2^*, & W_3^* \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

布局优化过程中的层合板为如图 4 所示的辅助层合板。而最终要得到的目标层合板是对称均衡铺设的, 单层厚度是确定值。因此铺层顺序优化就是要找到铺设角度序列最佳的层合板, 使其与布局优化后的层合板按照式(8)计算出来的弯曲刚度参数最接近。

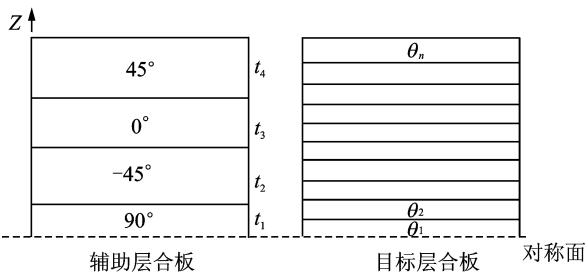


图 4 两种层合板结构示意图

由式(8)计算得到的辅助层合板的等效刚度参数可表示为

$$\begin{cases} W_1^* = \left(\frac{t_1+t_2+t_3}{t}\right)^3 - \left(\frac{t_1+t_2}{t}\right)^3 - \left(\frac{t_1}{t}\right)^3 \\ W_2^* = 2\left(\frac{t_1}{t}\right)^3 - 2\left(\frac{t_1+t_2}{t}\right)^3 + 2\left(\frac{t_1+t_2+t_3}{t}\right)^3 - 1 \\ W_3^* = \left(\frac{t_1}{t}\right)^3 - \left(\frac{t_1+t_2}{t}\right)^3 - \left(\frac{t_1+t_2+t_3}{t}\right)^3 + 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $t=t_1+t_2+t_3+t_4$ 。

目标层合板的等效刚度参数可表示为

$$\begin{cases} W_1^* = \frac{1}{n^3} \sum_{k=1}^n [k^3 - (k-1)^3] \cos 2\theta_k \\ W_2^* = \frac{1}{n^3} \sum_{k=1}^n [k^3 - (k-1)^3] \cos 4\theta_k \\ W_3^* = \frac{1}{n^3} \sum_{k=1}^n [k^3 - (k-1)^3] \sin 2\theta_k \end{cases} \quad (11)$$

将辅助层合板的厚度根据单层厚度圆整后的值作为目标层合板的厚度。铺层顺序优化的优化模型如下

$$\begin{aligned} \text{find} \quad & \theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_n]^T \\ \text{min} \quad & \sqrt{\left(\frac{W_1^* - W_{1opti}^*}{W_{1opti}^*}\right)^2 + \left(\frac{W_2^* - W_{2opti}^*}{W_{2opti}^*}\right)^2 + \left(\frac{W_3^* - W_{3opti}^*}{W_{3opti}^*}\right)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $\theta_i$  为铺层角度;  $W_{1opti}^*, W_{2opti}^*, W_{3opti}^*$  为布局优化后的辅助层合板的弯曲刚度参数;  $W_1^*, W_2^*, W_3^*$  为目标层合板的弯曲刚度参数。这是一个非线性规划的优化问题, 通过多岛遗传算法实现。

### 2.3 协同综合

布局优化后结构的层合板是辅助层合板, 而铺层顺序优化后, 结构的屈曲因子通常会有所提高。这样就会导致最终结果仍存在优化余量。对此, 本文使用一种协同综合的方法来实现加筋板结构的综合最优。

在布局优化结束后, 保持其他参数不变, 在  $\lambda^*$  的值附近取  $m$  个数作为临界屈曲因子,  $m$  的值可自行给定。对每一个临界屈曲因子都建立优化模型进行铺层厚度优化, 优化模型如下

$$\begin{aligned} \text{min} \quad & W(\mathbf{T}) \\ \text{s. t.} \quad & \lambda(\mathbf{T}) \geq \lambda_k \\ & \sigma_i(\mathbf{T}) \leq [\sigma_i] \\ & \epsilon_i(\mathbf{T}) \leq [\epsilon_i] \end{aligned}$$

$$T_L \leq T \leq T_U \quad (13)$$

式中： $\lambda_k$  为第  $k$  个优化模型的临界屈曲因子 ( $k=1 \sim m$ )； $T_L$  和  $T_U$  为铺层厚度变量  $T$  的下限值和上限值；其他参数同式(2)。

这些模型优化后可以得到  $m$  个最优重量和结构的屈曲因子。在这些结果中找到满足约束要求的最佳结构作为最终优化结果。

## 3 算例

### 3.1 问题描述

以文献[15]中 3.4.1 节第 3 个算例的加筋板为原型进行优化计算。结构模型如图 5 所示，加筋板为矩形，长  $L=370$  mm，宽  $B=390$  mm。沿宽度方向有 3 个等距的 T 型筋条。加筋板四边简支，受压剪复合载荷，载荷大小为： $N_x=516.0$  N/mm， $N_{xy}=366.7$  N/mm。蒙皮的初始铺层顺序为  $[45/-45/0/90/-45/45/90/45 /-45/0_3/-45/45/90]_s$ ；筋条垂直缘条初始铺层为  $[\pm 45_4/0/90_2/\pm 45/0_3/-45/0_4/45_2/0_4/-45/0_3/-45/45/90/0_{12}]_s$ ；筋条水平缘条初始铺层为  $[90/45/-45/0_3/-45/0_4/45]_s$ 。复合材料的单层厚度为 0.117 mm，材料属性如表 1 所示，材料许用应力为： $[\sigma_1]=1\ 500$  MPa， $[\sigma_2]=50$  MPa， $[\tau]=106$  MPa；许用应变为： $[\epsilon_1]=3\ 500$   $\mu\epsilon$ ， $[\epsilon_2]=3\ 500$   $\mu\epsilon$ ， $[\gamma_{12}]=4\ 500$   $\mu\epsilon$ 。结构初始屈曲因子为 0.972 78，初始重量为 1.136 kg。

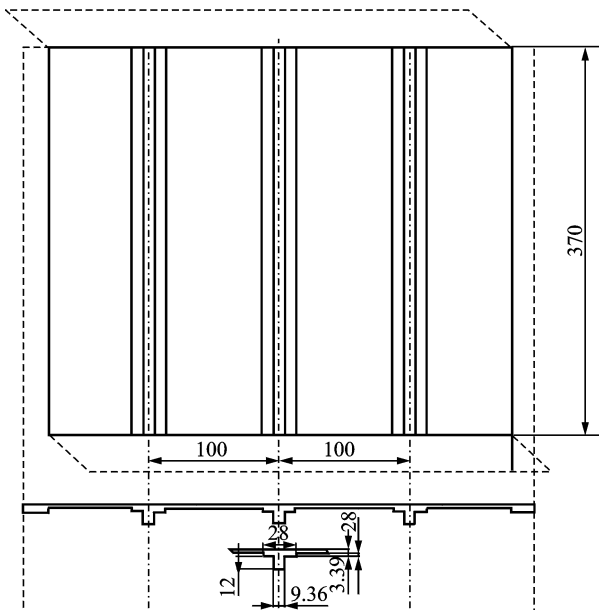


图 5 加筋板结构模型

表 1 材料属性

$E_1/\text{GPa}$	$E_2/\text{GPa}$	$G/\text{GPa}$	$\mu$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$
125.0	7.2	4.7	0.33	$1.5 \times 10^{-6}$

### 3.2 结构布局优化

布局变量的取值范围如表 2 所示。其中筋条截面形状中的数字 1 到 6 各自代表一种截面形状，如图 2 所示，数字 1 代表 L 型，2 代表 T 型，3 代表工型，4 代表 Z 型，5 代表帽型 1，6 代表帽型 2。临界屈曲因子  $\lambda^*=1.0$ 。

在设计变量变化范围内选取变量初值，然后进行循环迭代计算。在每次迭代过程中记录并行优化后的最优重量平均值，其变化过程如图 6 所示。布局优化后的主要参数见表 3。

表 2 变量变化范围

变量类型	变量名称	取值范围
离散变量	筋条截面形状 $S$	{1,2,3,4,5,6}
	筋条个数 $N$	{2,3,4,5,6}
连续变量	垂直缘条宽度 $b_w/\text{mm}$	20~30
	水平缘条宽度 $b_f/\text{mm}$	6~18
	单层厚度最小值 $t_{\min}/\text{mm}$	0.117
	单层厚度最大值 $t_{\max}/\text{mm}$	5.000

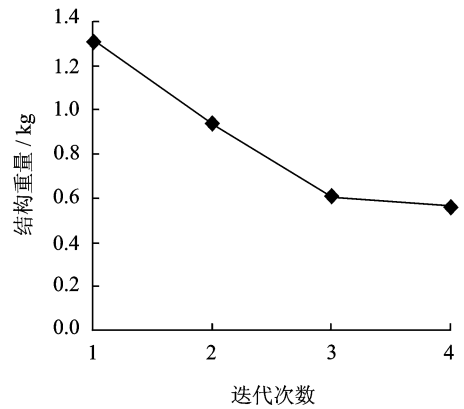


图 6 重量迭代过程

表 3 布局优化结果

$S$	$N$	$b_w/\text{mm}$	$b_f/\text{mm}$
帽型 1	5	20.53	6.70

根据布局优化后的参数建立有限元模型。分别以 0.95, 0.9, 0.85 为临界屈曲因子，建立 3 个优化模型，并对这 3 个模型进行铺层厚度优化。4 个屈曲水平的铺层厚度优化结果见表 4。

表4 布局优化后层合板铺层厚度

层合板	$\lambda^*$	$t_0^\circ /$ mm	$t_{45^\circ/-45^\circ} /$ mm	$t_{90^\circ} /$ mm	$t_{总} /$ mm
蒙皮	0.85	0.266	0.117	0.261	0.762
	0.90	0.273	0.117	0.271	0.778
	0.95	0.274	0.117	0.281	0.790
	1.00	0.281	0.117	0.281	0.796
水平 缘条	0.85	0.242	0.117	0.117	0.593
	0.90	0.281	0.117	0.117	0.632
	0.95	0.333	0.117	0.117	0.684
	1.00	0.391	0.117	0.117	0.742
垂直 缘条	0.85	0.117	0.117	0.117	0.468
	0.90	0.119	0.117	0.117	0.471
	0.95	0.117	0.117	0.117	0.468
	1.00	0.117	0.117	0.117	0.469

### 3.3 铺层顺序优化

按照2.2节所述的等效刚度法对表2的结果进行铺层顺序的优化,优化后的屈曲因子和结构重量见表5。

表5 铺层优化后屈曲因子和质量

$\lambda^*$	1.081	1.010	1.016	0.878
W/kg	0.579	0.566	0.566	0.566

### 3.4 协同综合

由表5中可以看出临界屈曲因子 $\lambda^* = 1.016$ 时对应的优化结果在重量最轻的结果中屈曲因子最大,为最佳结果。最终优化结果见表6,优化后的铺层顺序见表7。本算例的加筋板结构经过优化后,在屈曲因子基本不变的情况下,结构重量从1.136 kg减少至0.566 kg,优化效果很好。

表6 最终优化结果

S	N	$b_w /$ mm	$b_l /$ mm	$\lambda$	W/kg
帽型1	5	20.53	6.70	1.016	0.566

表7 优化后的铺层顺序

	铺层顺序	层数
蒙皮	$[\pm 45/0_2/\pm 45/90]_s$	14
水平缘条	$[\pm 45/0_3/90]_s$	12
垂直缘条	$[\pm 45/0_2/90]_s$	10

## 4 结束语

本文主提出的并行协同优化方法将整个加筋

板的布局优化问题划分为3个并行的子优化问题,很好地解决了变量耦合的问题。避免了同时对大量的设计变量进行优化计算,有效降低了结构分析的非线性程度。算例结果表明这种优化方法不仅合理而且有很好的优化效果。

### 参考文献:

- [1] 刘克龙,姚卫星,余雄庆. 运用低自由度协同优化的机翼结构气动多学科设计优化[J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1025-1032.  
Liu Kelong, Yao Weixing, Yu Xiongqing. Multidisciplinary structural-aerodynamic design optimization of wings with low degree-of-freedom collaborative optimization[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(5): 1025-1032.
- [2] Blair M, Hill S, Weisshaar T A. Rapid modeling with innovative structural concepts[R]. AIAA-98-1755, 1998.
- [3] 张铁亮,丁运亮. 复合材料加筋壁板的结构布局优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1): 8-12.  
Zhang Tieliang, Ding Yunliang. Structural layout optimization of composite stiffened panel[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(1): 8-12.
- [4] Nagendra S, Jestin D, Gurdal D, et al. Improved genetic algorithm for the design of stiffened composite Panels [J]. Computers and Structures, 1996, 58(3): 543-555.
- [5] Fatemi J, Trompette P. Optimization of stiffened plates using a modified genetic algorithm[R]. AIAA-98-4973, 1998.
- [6] Kang J H, Kim C G. Minimum-weight design of compressively loaded composite plates and stiffened panels for post-buckling strength by genetic algorithm[J]. Composite Structures, 2005, 69(2): 239-246.
- [7] Lanzi L, Bisagni C. Minimum weight optimization of composite stiffened panel using neural networks[R]. AIAA-2003-1698, 2003.
- [8] 李烁,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 surfaces[J]. Acta Materiae Composi-

- tae Sinica, 2005, 22(5): 134-140.
- [9] Berke L, Patnaik S N, Murthy P L N. Optimum design of aerospace structural components using neural networks[J]. Computers & Structures, 1993, 48(6): 1001-1010.
- [10] Rikards R, Abramovich H, Auzins J, et al. Surrogate models for optimum design of stiffened composite shells [J]. Composite Structures, 2004, 63(2): 243-251.
- [11] 赵群, 丁运亮, 金海波. 一种基于复合材料加筋板结构效率的稳定性优化方法[J]. 复合材料学报, 2010, 27(3): 169-176.  
Zhao Qun, Ding Yunliang, Jin Haibo. Buckling optimization method based on structure efficiency of composite stiffened panels[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(3): 169-176. [12] 乔巍, 姚卫星. 复合材料加筋板铺层优化设计的等效弯曲刚度法[J]. 计算力学学报, 2011, 28(1): 158-162.  
Qiao Wei, Yao Weixing. Equivalent bending stiffness method for stacking sequence optimization of composite stiffened panel[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(1): 158-162.
- [13] 吴莉莉, 姚卫星. 复合材料加筋板结构的二级协同优化设计方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(5): 645-649.  
Wu Lili, Yao Weixing. Two-level collaborative optimum design method for composite stiffened panel [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(5): 645-649.
- [14] Haftka R T, Walsh R L. Stacking-sequence optimization for buckling of laminated plates by integer programming[J]. AIAA Journal, 1992, 30(3): 814-819.
- [15] 中国航空研究院. 复合材料结构稳定性分析指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.  
Chinese Aeronautical Establishment. Stability analysis of composite structures guide[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.