

# 多铺层碳纤维蜂窝板模型修正

秦玉灵<sup>1</sup>, 孔宪仁<sup>1,\*</sup>, 罗文波<sup>2</sup>

1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 黑龙江 150001

2. 中国空间技术研究院, 北京 100086

**摘要:** 蜂窝板是现代飞行器的主要承力结构,通过分析各形式响应面适用范围,提出 Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机(SVM)响应面和基于分组控制策略的改进粒子群优化(IPSO)算法。用 ANSYS 的 SHELL91 单元建立多铺层碳纤维蜂窝板的有限元模型(FEM),并通过正交试验设计和  $F$  值检验确定待修正结构参数,构造 Linear-and-Gaussian 响应面以拟合待修正结构参数与蜂窝板模态频率的关系并检验响应面模型有效性。最后,用基于分组控制策略的 IPSO 算法对响应面模型中的结构参数进行修正,修正后参数代入原有限元模型得到修正模型。通过对修正前后模型模态频率与基准模型模态频率在测试频段内外的对比,证实了修正后模型具有良好的复现能力和预测能力。

**关键词:** 响应面;多铺层碳纤维蜂窝板;组合核支持向量机;分组控制策略;粒子群优化算法

中图分类号: V414 文献标识码: A

现代飞行器结构普遍采用蜂窝板作为主要承力结构,蜂窝板是一种特殊的高强度轻质复合材料,具有较高的比强度、比刚度,以及较好的隔热隔振和耐冲击等优点。通常其由较薄的上下蒙皮层和中间较厚但质软的蜂窝夹芯层构成。蒙皮层可以是单层金属层,也可以是按不同角度铺设的多层纤维层;蜂窝夹芯可以分为正六边形、菱形和矩形等,其中正六边形蜂窝夹芯因用料省、制造简单、结构效率最高而在航空航天领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。蜂窝板材料参数由上下蒙皮层材料类型、铺设方式、层厚度及蜂窝夹芯层胞元形状和材料等参数决定。MSC/NASTRAN 和 ANSYS 等大型通用有限元软件中没有蜂窝结构单元库,无法在建模时直接定义材料参数,只能先对蜂窝板进行等效获得等效结构参数再进行计算。由于等效过程中对结构参数计算进行了合理简化,所

得等效参数与实际结构参数必然存在差异,导致有限元计算结果与试验测量值之间亦有差异。利用结构现场实测的振动信息修正结构有限元模型(FEM),使得修正后结构分析的模态参数与试验值趋于一致,即为有限元模型修正。结构模态频率是影响其动力学特性的重要因素,因此在模型修正过程中一般以结构模态频率为修正目标。模型修正方法主要有矩阵型和元素型两种,前者以有限元总体矩阵或子结构矩阵为修正对象,修正结果物理意义不明确;后者以矩阵中元素为修正对象,具有较强的修正能力和工程实用性<sup>[3]</sup>。粒子群优化(PSO)算法是元素型修正方法的一种,该算法形式简洁,便于改进且具有较高的搜索效率,近年来开始应用于模型修正领域。响应面方法用显式函数式近似模拟结构响应与有限元模型参数之间复杂的隐式关系,基于响应面的模型修

收稿日期:2010-07-01; 退修日期:2010-09-30; 录用日期:2010-11-15; 网络出版时间:2010-11-30 17:43

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101130.1743.000.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20101130.1743.000

基金项目:“微小型航天器系统技术”长江学者创新团队发展计划(IRT0520)

\* 通讯作者. Tel.: 0451-86402357 E-mail: kongxr@hit.edu.cn

引用格式: 秦玉灵, 孔宪仁, 罗文波. 多铺层碳纤维蜂窝板模型修正[J]. 航空学报, 2011, 32(4): 636-648. Qin Yuling, Kong Xianren, Luo Wenbo. Model updating for multi-layered carbon fiber honeycomb sandwich panel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(4): 636-648.

正方法可以避免每次迭代中调用有限元程序,提高计算效率<sup>[4]</sup>。

本文以多铺层蜂窝板的材料参数为修正对象,通过搜索材料参数摄动量缩小待修正模型与基准模型之间模态频率的差异。首先通过分析各形式响应面拟合原理及适用范围,提出了综合一次多项式(Linear)核的线性拟合能力和 Gaussian 核的非线性拟合能力的 Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机(SVM)响应面,并提出了引入混沌搜索机制和变异算子的基于分组控制策略的改进粒子群优化(IPSO)算法。然后用 ANSYS 的 SHELL91 单元建立多铺层碳纤维蜂窝板的有限元模型,通过正交试验设计和  $F$  值检验确定蜂窝板模型中的待修正结构参数,并构造模拟待修正结构参数与蜂窝板模态频率关系的 Linear-and-Gaussian 响应面,响应面模型的有效性用相对均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)和决定系数  $R^2$  进行评价。最后用基于分组控制策略的 IPSO 算法对响应面模型中的结构参数进行修正,修正后参数代入原有限元模型得到修正模型。通过对修正前后模型模态频率与基准模型模态频率在测试频段内外的对比,以及修正前后原点频响函数与跨点频响函数幅值相关系数与基准模型比较,证实了修正后模型具有良好的复现能力和预测能力。

## 1 Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机响应面

Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机响应面的核函数由 Linear 核和 Gaussian 核组成,多个算例结果表明 Linear 核对线性函数具有良好的拟合能力,Gaussian 核对非线性函数具有良好的拟合精度,而 Linear-and-Gaussian 组合核同时具有 Linear 核的线性拟合能力和 Gaussian 核的非线性拟合精度,是一种拟合精度较高和适用范围广泛的响应面形式。本文分别用 Linear 核、二次多项式核、Gaussian 核和 Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机响应面对蜂窝板结构参数与模态频率响应的关系进行拟合,以证实组合核的有效性。4 种核函数响应面表达式<sup>[5-6]</sup>为

$$\text{Linear 核: } \hat{y}(\mathbf{x}) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (1)$$

$$\text{完全二次核: } \hat{y}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n b_i x_i^2 \quad (2)$$

Gaussian 核:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n d_i \exp\left(-\frac{\|x_i - \bar{x}\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

Linear-and-Gaussian 组合核:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n d_i \exp\left(-\frac{\|x_i - \bar{x}\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$  为设计变量(待修正参数);  $n$  为设计变量(待修正参数)的个数;  $\bar{x}$  为设计变量  $\mathbf{x}$  中各分量的平均值;  $\sigma$  为待定系数; 响应面系数向量  $\mathbf{A} = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_n \ d_1 \ d_2 \ \dots \ d_n]$  一般由最小二乘法(LSM)确定。

## 2 基于分组控制策略的 IPSO 算法

PSO 算法是近年来新兴的仿生学优化算法,具有简洁明确的表达形式,能高效搜索设计空间中的最优解<sup>[7]</sup>。作为一种随机算法,PSO 算法不能免除搜索结果不确定性等缺点,可以通过改变参数或引进新的思想等方式对算法进行改进,以提高其寻优能力。PSO 算法中粒子随机分散于设计空间,处于较好位置的粒子比处于较差位置的粒子具有更快搜索到其自身附近最优解的能力。PSO 算法迭代搜索过程中的每代粒子都可分为优良粒子和劣质粒子两类:优良粒子能为群体飞行方向提供指导,吸引粒子群体向它本身或周围最优位置靠近,但也可能引导整个种群陷入局部最优;劣质粒子则在周围优良粒子的引导下飞行,本身难以搜索到优良解,只能被动接受优良粒子指导,对于整个种群的进化没有引导作用。据此,本文提出了基于分组控制策略的 IPSO 算法,将粒子群体按适应度分为优解和劣解两大类:对优解引入混沌搜索机制,以降低其陷入局部最优的概率;对劣解进行变异,以提高其自身质量及搜索效率。图 1 给出了基于分组控制策略的 IPSO 算法流程。

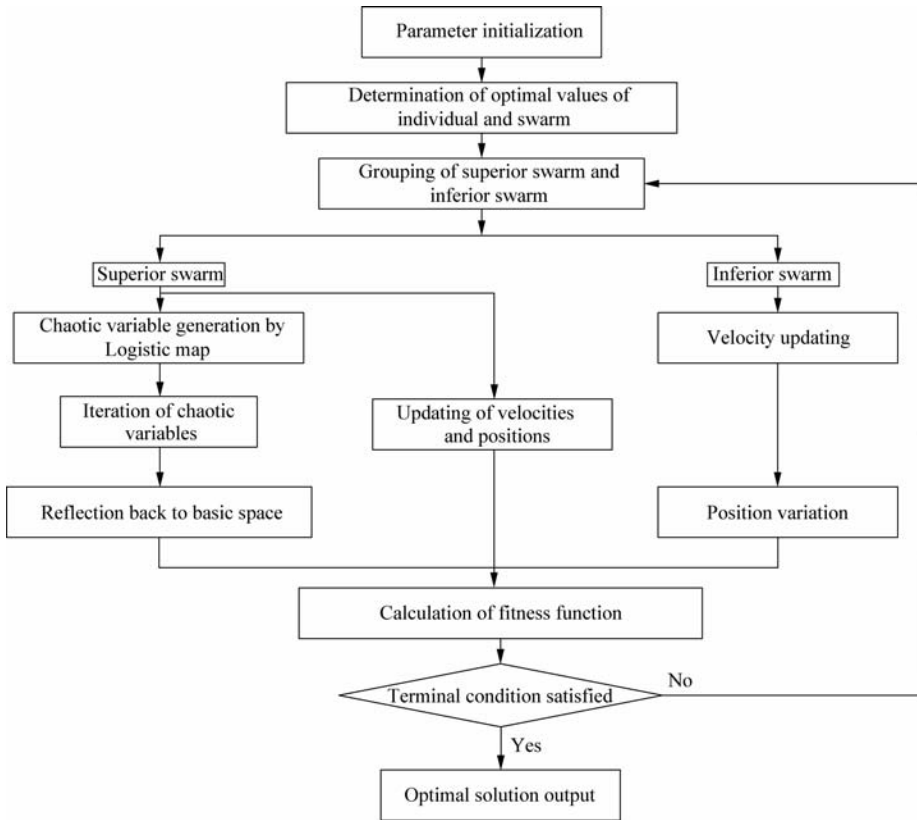


图1 基于分组控制的 IPSO 算法流程

Fig. 1 Flow chart of group-control-based IPSO algorithm

## 2.1 优解群中引入混沌搜索机制

优解群中粒子的 Logistic 映射表达式<sup>[8-9]</sup>为

$$cx_{t+1} = \mu cx_t (1 - cx_t) \quad (5)$$

式中:  $x_t$  为第  $t$  次迭代中的设计变量(待修正参数); 混沌变量  $cx$  中的每个元素  $cx_i \in (0, 1)$ ;  $\mu$  为控制变量, 一般在  $(3.569\ 945\ 6, 4]$  之间取值。  $\mu=4$  时为完全混沌状态, 此时  $cx_i$  在  $(0, 1)$  范围内遍历。 Logistic 映射有 3 个不动点  $(0.25, 0.50, 0.75)$ , 在参数设定过程中应避免使用这些不动点。

混沌变量  $cx$  与普通变量  $x$  可以通过式(6)和式(7)进行往复映射:

$$cx_t = (x_t - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (6)$$

$$x_t = x_{\min} + cx_t (x_{\max} - x_{\min}) \quad (7)$$

式中:  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为设计空间中变量  $x$  的取值上下限。

## 2.2 劣解群中引入变异机制

对劣解群中的第  $i$  个粒子的  $d$  维位置进行变异操作, 采用增加随机扰动<sup>[10-11]</sup>的方式, 即

$$\left. \begin{aligned} v_{id}^{t+1} &= \chi [v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{gd}^t)] \\ x_{id}^{t+1} &= v_{id}^{t+1} (1 + \eta N(0, 1)) + x_{id}^t \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:  $c_1$  和  $c_2$  为大于 0 的常数, 分别代表对自身经历的最优位置和种群最优位置的记忆能力;  $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  之间均匀分布的随机数;  $\chi$  为收缩因子, 且  $\chi = 2 / |2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|$ , 一般取  $\varphi = c_1 + c_2 > 4$ ,  $\chi = 0.729$  时, 能取得良好的计算结果;  $p_{id}$  和  $p_{gd}$  分别为第  $t$  次迭代终止时第  $i$  个粒子的最优位置和群体最优位置;  $N(0, 1)$  为服从 Gaussian  $(0, 1)$  分布的随机变量;  $\eta$  为常数, 用来控制扰动步长,  $\eta$  计算公式为

$$\eta = \eta_{\max} - \frac{(\eta_{\max} - \eta_{\min})t}{t_{\max}} \quad (9)$$

式中:  $t$  为当前迭代次数;  $t_{\max}$  为最大迭代次数;  $\eta_{\max}$  和  $\eta_{\min}$  为  $\eta$  取值的上下限。经多次试验可知, 取  $\eta_{\max} = 2.3$ 、 $\eta_{\min} = 1.1$  时, 算法性能得到明显改善。

### 3 多铺层碳纤维蜂窝板模型修正流程

多铺层碳纤维蜂窝板模型修正流程如图 2 所示, 具体描述如下:

**步骤 1** 用三明治夹芯板理论计算蜂窝板等效结构参数。

**步骤 2** 用基于正交设计的试验设计方法进行试验设计, 通过  $F$  值检验判定各结构参数对频率响应的影响, 从而确定用于构造响应面的待修正参数, 并根据参数影响程度确定响应面核函数的加权矩阵。

**步骤 3** 用 ANSYS 中的 SHELL91 单元建立多铺层碳纤维蜂窝板模型, 计算蜂窝板各组参数下的响应。

**步骤 4** 构造加权 Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机响应面, 参数归一化并用 LSM 确定响应面函数系数向量。

**步骤 5** 响应面模型有效性判定, 有效则进入下一步分析, 否则返回步骤 2。

**步骤 6** 用响应面计算所得响应  $\hat{y}$  与有限元计算响应  $y$  的偏差构造适应度函数。

**步骤 7** 用 IPSO 算法修正结构参数, 设定粒子群规模  $N$ 、迭代次数  $T$ 、初始化粒子群位置  $x_0$  和速度  $v_0$ , 计算各粒子适应度函数值  $f_0$ , 选定各初始粒子位置为自身历史最优位置  $p_{\text{best}}$ , 并将适应度函数值最小的粒子设为初始群中的群体最优粒子  $g_{\text{best}}$ 。

**步骤 8** 更新粒子位置和速度, 计算适应度函数。

**步骤 9** 判断是否满足终止条件, 满足则输出修正量; 否则返回步骤 8 继续计算。

**步骤 10** 将修正量代入有限元模型, 模型计算质量得到改善, 进行多种分析计算。

#### 3.1 多铺层碳纤维蜂窝板建模

某飞行器的一块蜂窝板上下蒙皮层材料为 T300/AG80 碳面板<sup>[12]</sup>, 面积为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , 厚度为  $e_1 = 0.7 \text{ mm}$ , 由碳布和无纬布交织铺层而成, 碳布每层厚  $0.2 \text{ mm}$ , 无纬布每层厚  $0.15 \text{ mm}$ , 铺

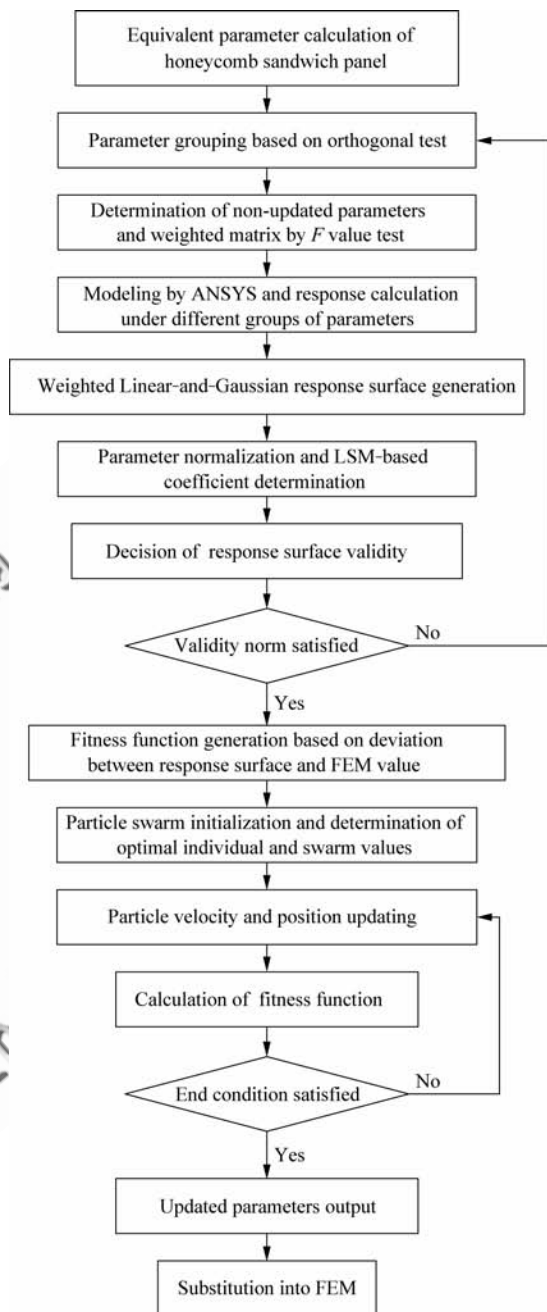


图 2 多铺层碳纤维蜂窝板模型修正流程  
Fig. 2 Model updating for multi-layer carbon fiber honeycomb sandwich panel

层方式为[碳布-45°/无纬布 90°/碳布 45°/无纬布 90°]; 正六边形铝蜂窝夹芯边长  $l = 4 \text{ mm}$ , 壁厚  $e_2 = 0.04 \text{ mm}$ , 夹芯层高度  $2h = 23.6 \text{ mm}$ , 则蜂窝板总厚度为  $2H = 2e_1 + 2h = 25 \text{ mm}$ , 铝的弹性模量为  $E = 70 \text{ GPa}$ , 剪切模量  $G = 27 \text{ GPa}$ , 密度为  $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ 。碳布和无纬布材料参数如表 1 所示, 由三明治夹芯板理论计

算公式<sup>[13-14]</sup>将铝蜂窝夹芯等效为一块同尺寸的正交各向异性材料均匀体,铝蜂窝夹芯材料参数如表2所示。表中: $E_{lx}$ 和 $E_{ly}$ 分别为蒙皮层材料 $x$ 和 $y$ 方向的弹性模量; $G_{lxy}$ 、 $G_{lxz}$ 和 $G_{lyz}$ 分别为蒙皮层材料 $xy$ 、 $xz$ 和 $yz$ 向的剪切模量; $\nu_l$ 为蒙皮层材料的泊松比; $\rho_l$ 为蒙皮层材料的密度; $E_{cx}$ 和 $E_{cy}$ 分别为蜂窝夹芯材料 $x$ 和 $y$ 向的弹性模量; $G_{cxy}$ 、 $G_{cxz}$ 和 $G_{cyz}$ 分别为蜂窝夹芯材料 $xy$ 、 $xz$ 和 $yz$ 向的剪切模量; $\nu_c$ 为蜂窝夹芯材料的泊松比; $\rho_c$ 为蜂窝夹芯材料的密度。

表1 蜂窝板蒙皮层材料参数

Table 1 Material parameters of faceplates

Parameter	Value
$E_{lx}/\text{GPa}$	130.5
$E_{ly}/\text{GPa}$	9.98
$G_{lxy}/\text{GPa}$	5.24
$G_{lxz}/\text{GPa}$	4.92
$G_{lyz}/\text{GPa}$	3.49
$\nu_l$	0.3
$\rho_l/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1560

表2 蜂窝夹芯等效材料参数

Table 2 Equivalent material parameters of honeycomb sandwich

Parameter	Value
$E_{cx}/\text{MPa}$	0.16
$E_{cy}/\text{MPa}$	0.16
$G_{cxy}/\text{MPa}$	0.06
$G_{cxz}/\text{GPa}$	0.16
$G_{cyz}/\text{GPa}$	0.23
$\nu_c$	0.33
$\rho_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	31.2

用ANSYS中的SHELL91壳单元建立多铺层蜂窝板模型,该单元有8个节点,每个节点6个自由度,开启KEYOPT(9)=1蜂窝板特性选项,即指定蜂窝夹芯板蒙皮层承受弯矩,夹芯层承受剪切效应,单元节点可以位于层的底部、中间和顶部,一般开启该选项时,应指定KEYOPT(5)=1,即节点位于层的底部,此时蒙皮层与夹芯层公用的节点可以同时具有两种材料属性。所建多铺层蜂窝板模型横向含一层壳单元,每个单元由9层不同铺层构成,以中间层(第5层)为对称层铺设,中间层为等效后的铝蜂窝夹芯层,有限元模型及分层图如图3和图4所示。图3中: $\theta$ 为铺层角;材料号中I表示蒙皮层材料,II表示夹芯层材料。

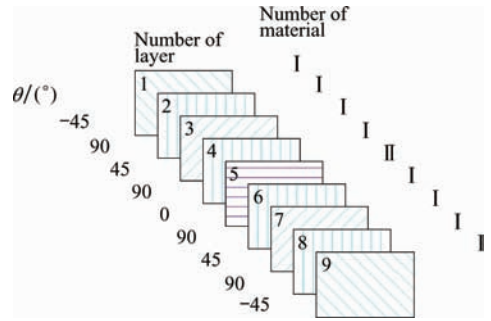


图3 蜂窝板分层图

Fig. 3 Layered graph of honeycomb sandwich panel

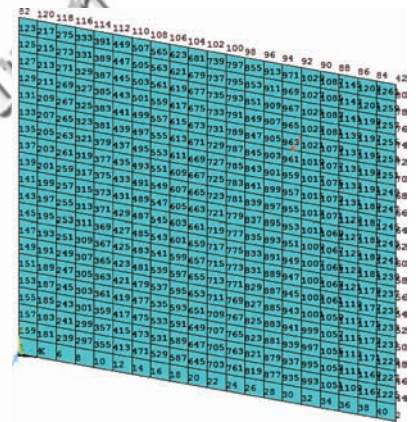


图4 蜂窝板有限元模型

Fig. 4 FEM of honeycomb sandwich panel

### 3.2 试验设计及响应面构造

多铺层碳纤维蜂窝板中蒙皮层材料的碳布与无纬布参数由材料手册上的实验测量数据查得,而铝蜂窝夹芯等效参数由三明治夹芯板理论计算获得,各参数均为试验值或等效值,存在不确定性误差,因此用正交设计表 $L_{27}(3^{13})$ 将蜂窝板蒙皮层和夹芯的13个材料参数 $E_{lx}$ 、 $E_{ly}$ 、 $G_{lxy}$ 、 $G_{lxz}$ 、 $G_{lyz}$ 、 $\nu_l$ 、 $\rho_l$ 、 $E_{cx}$ 、 $E_{cy}$ 、 $G_{cxy}$ 、 $G_{cxz}$ 、 $G_{cyz}$ 、 $\nu_c$ 和 $\rho_c$ 分为27组设计点,每个参数在设计空间中分为3个水平,用ANSYS计算各组参数对应的蜂窝板模态频率,然后用方差分析(F值检验)计算各参数显著性水平,选取显著性水平高的参数构造响应面。方差分析的基本思想是将样本数据的总偏差平方和分解为各因素及误差的偏差平方和,然后求出F值,用F值检验法找出显著性参数。假设对有限元模型的设计参数(因素)A进行F检验,则A的F值为

$$F_A = \frac{S_A/f_A}{S_e/f_e} \rightarrow F(f_A, f_e) \quad (10)$$

式中: $S_A$ 和 $S_e$ 分别为因素A和误差e的偏差平

方和;  $f_A$  和  $f_e$  分别为因素 A 和偏差 e 的自由度, 一般由  $f = g - 1$  计算,  $g$  为因素水平数。

对于给定的显著性水平  $\alpha$ ,  $F$  值检验的法则为: 若  $F_A \geq F_{1-\alpha}(f_A, f_e)$ , 则认为设计参数 A 影响显著, 否则认为不显著。取显著性水平  $\alpha = 0.05$  进行  $F$  值检验, 检验结果为各参数对模态频率影响均不显著, 将各参数按  $F$  值排序(如表

3 所示), 选取对各阶测试频率检验  $F$  值大的结构参数构造响应面。一个好的有限元模型应该不仅能够重现测试频段内的结构频率, 而且能够以一定精度预测测试频段外的模态频率。因此将蜂窝板前 6 阶模态频率作为测试频率, 后 4 阶频率作为检测频率, 来考察响应面模型的准确性和预测能力。

表 3 结构参数影响力排序

Table 3 Influence of structure parameters

Modal order	Ranking of influential factors						
1	Factor	$\rho_t$	$E_{tx}$	$\rho_c$	$G_{txy}$	$E_{ty}$	$G_{tzy}$
	F value	1.005 8	1.005 7	1.000 6	1.000 2	1.000 0	1.000 0
2	Factor	$\rho_t$	$E_{tx}$	$\rho_c$	$E_{ty}$	$G_{txy}$	$G_{cxy}$
	F value	1.005 7	1.004 0	1.000 6	1.000 3	1.000 3	1.000 0
3	Factor	$E_{tx}$	$\rho_t$	$\rho_c$	$\nu_t$	$G_{txy}$	$G_{tzy}$
	F value	1.008 3	1.005 7	1.000 7	1.000 0	1.000 0	1.000 0
4	Factor	$\rho_t$	$E_{tx}$	$\rho_c$	$G_{txy}$	$E_{ty}$	$G_{tzy}$
	F value	1.005 8	1.005 4	1.000 7	1.000 2	1.000 1	1.000 0
5	Factor	$\rho_t$	$E_{tx}$	$\rho_c$	$G_{txy}$	$E_{ty}$	$G_{tzy}$
	F value	1.005 8	1.005 7	1.000 7	1.000 2	1.000 0	1.000 0
6	Factor	$\rho_t$	$E_{tx}$	$\rho_c$	$E_{ty}$	$G_{txy}$	$\nu_t$
	F value	1.005 7	1.004 6	1.000 6	1.000 3	1.000 1	1.000 0

对多铺层碳纤维蜂窝板的前 6 阶模态频率与 13 个结构参数的  $F$  值检验结果进行分析可知: 各参数  $F$  值近似, 即各参数对频率响应的影响程度接近。综合分析后选取对前 6 阶频率影响程度均较高的前 6 个结构参数 ( $\rho_t$ ,  $E_{tx}$ ,  $\rho_c$ ,  $G_{txy}$ ,  $E_{ty}$  和  $G_{tzy}$ ) 构造 Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机响应面为

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i x_i + \sum_{i=1}^6 d_i \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{x} = [\rho_t \ E_{tx} \ \rho_c \ G_{txy} \ E_{ty} \ G_{tzy}]$  为从多铺层碳纤维蜂窝板的蒙皮层和夹芯材料参数中选取的 6 个结构参数, 变化范围设定为在原值上下浮动 20%, 即  $\mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max}$  ( $\mathbf{x}_{\min} = (1 - 20\%) \mathbf{x}$ ,  $\mathbf{x}_{\max} = (1 + 20\%) \mathbf{x}$ ); 为避免不同量级的结构参数在矩阵求解时可能出现奇异阵的情况, 通常在修正过程中先将各参数作归一化处理, 待修正量确定后再将其返回原设计空间; 经多次试验发现待定系数  $\sigma$  取参数设计空间半径(即参数取值范围半径)时可以取得良好的计算效果; 响应面系数向量  $\mathbf{A} = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_6 \ d_1 \ d_2 \ \dots \ d_6]$  由最

小二乘法依下式确定:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为样本点数据的设计矩阵;  $\mathbf{Y}$  为样本点模态频率响应值  $\hat{y}(\mathbf{x})$  组成的列向量。

### 3.3 响应面有效性评价

响应面模型有效性由相对 RMSE 和决定系数  $R^2$  进行评价, 当  $\text{RMSE} \rightarrow 0$  且  $R^2 \rightarrow 1$  时, 响应面精度高, 其计算公式<sup>[15]</sup>为

$$\text{RMSE}_i = \frac{1}{k\bar{y}} \sqrt{\sum_{j=1}^k (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2} \quad (13)$$

$$R_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^k (\hat{y}_{ij} - \bar{y})^2}{\sum_{j=1}^k (y_{ij} - \bar{y})^2} \quad (14)$$

式中:  $k = 27$  为试验设计的参数组数;  $i = 1, 2, \dots, 6$  为模态频率数;  $\hat{y}_{ij}$  为响应面计算值;  $y_{ij}$  为对应点处 FEM 计算值;  $\bar{y}$  为 FEM 计算值平均数。

模态分析为线性分析, 因此多铺层碳纤维蜂窝板的 6 个结构参数与模态频率之间的关系用 Linear 核和 Linear-and-Gaussian 组合核支持向

量机响应面模拟精度远高于二次多项式和 Gaussian 核函数支持向量机响应面。4 种响应面的相对 RMSE 和  $R^2$  如图 5 所示, 适合模拟非线性因素的二次多项式核响应面与 Gaussian 核函数响应面精度近似且最差。Linear 核响应面精度略低于 Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机响应面。

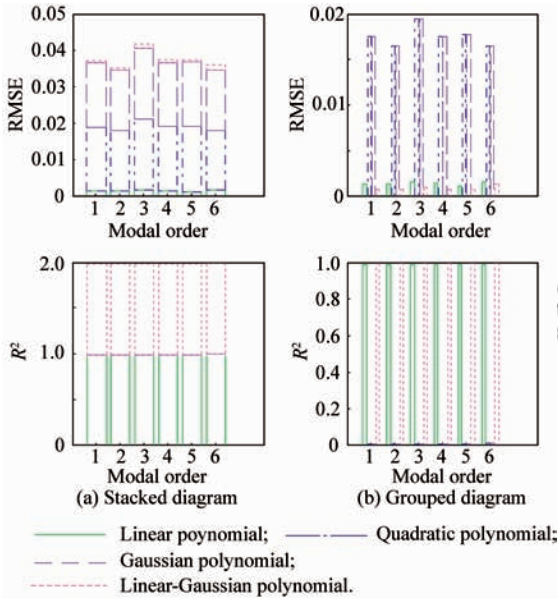


图 5 4 种响应面误差直方图

Fig. 5 Error histogram of four response surfaces

Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机响应面具有良好的拟合精度, 本例多铺层蜂窝板的模型修正过程用此响应面进行模拟。

### 3.4 适应度函数构造

本例多铺层碳纤维蜂窝板模型修正用结构前 6 阶模态频率的响应面计算值  $\hat{y}$  和 FEM 计算值  $y$  的相对误差构造适应度函数, 以表 1 和表 2 中蜂窝板的碳纤维蒙皮层和铝蜂窝夹芯等效结构参数建立的 FEM 作为基准模型  $M_0$ , 计算所得前 6 阶模态频率为  $y^0 = [f_1^0 \ f_2^0 \ \dots \ f_6^0]$ , 设定构造响应面的 6 个结构参数  $x^0 = [\rho_f^0 \ E_{Lr}^0 \ \rho_c^0 \ G_{Lry}^0 \ E_{Ly}^0 \ G_{Lyz}^0]$  为待修正量, 对各待修正量施加扰动量  $\Delta x = [20\% \ -20\% \ 20\% \ -20\% \ -20\% \ 20\%]$ , 则扰动后参数为  $x^1 = [\rho_f^1 \ E_{Lr}^1 \ \rho_c^1 \ G_{Lry}^1 \ E_{Ly}^1 \ G_{Lyz}^1]$ ,  $x^1 = (1 + \Delta x)x^0$ , 所建模型为待修正模型  $M_1$ , 计算所得前 6 阶模态频率为  $y^1 = [f_1^1 \ f_2^1 \ \dots \ f_6^1]$ , 用所构建的 Linear-and-Gaussian

组合核支持向量机响应面计算扰动后参数  $x^1 = [\rho_f^1 \ E_{Lr}^1 \ \rho_c^1 \ G_{Lry}^1 \ E_{Ly}^1 \ G_{Lyz}^1]$  处的频率响应  $\hat{y}^1 = [\hat{f}_1^1 \ \hat{f}_2^1 \ \dots \ \hat{f}_6^1]$ , 由于 Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机响应面已经构造完成, 其系数向量为确定值, 因此缩小响应面计算值  $\hat{y}$  与 FEM 计算值  $y$  之间的差异需通过调整响应面中的自变量(结构参数摄动量)完成, 用本文提出的 IPSO 算法对待修正参数的摄动量(修正量)进行寻优, 粒子每次搜索所得的摄动量构成新的一组设计点, 代入响应面模型计算该组设计点处的模态频率  $\hat{y}$ , 用  $\hat{y}$  与  $y^0 = [f_1^0 \ f_2^0 \ \dots \ f_6^0]$  的相对误差构造适应度函数, 引导粒子群中粒子持续搜索, 直至使得该适应度函数取得极小值的结构参数摄动量达到迭代终止条件, 搜索到的摄动量代入待修正模型  $M_1$  中即得到修正后模型  $M_2$ , 计算模型  $M_2$  的前 6 阶模态频率与基准模型  $M_0$  比较, 评价修正效果, 同时为了考察修正后模型的预测能力, 计算  $M_2$  的 7~10 阶模态频率并与基准模型  $M_0$  对比, 分析预测效果。

模态频率测量精度随着振动设备的改进和测试技术的提高而不断提高, 而振型的测量精度相对较差, 因而在实际修正过程中, 一般以模态频率为优化目标进行修正。本例构造适应度函数形式为

$$\min \text{fit}(x) = \min \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{f}_i - f_i}{f_i} \right| \quad (15)$$

式中:  $x = [\rho_f \ E_{Lr} \ \rho_c \ G_{Lry} \ E_{Ly} \ G_{Lyz}]$  为待修正参数, 由于设定待修正结构参数范围为在原值上下浮动 20%, 故  $0.8x_0 \leq x \leq 1.2x_0$ ;  $n = 6$  为修正模态数;  $f_i$  为有限元基准模型第  $i$  阶计算频率;  $\hat{f}_i$  为响应面模型第  $i$  阶计算频率。

### 3.5 IPSO 算法修正及有效性检验

用标准 PSO 算法及本文提出的 IPSO 算法对参数摄动量进行搜索并比较, 以证明 IPSO 算法的优越性。取粒子群规模  $N = 30$ , 粒子维数  $D = 6$  (每个待修正参数为一维), 迭代次数  $T = 25$ , 算法重复执行 50 次, 取各次计算所得适应度函数的平均值绘制适应度函数收敛曲线, 并取每

次计算所得最优解的平均值作为待修正参数摄动量。搜索空间范围(粒子位置  $\mathbf{x}$  和速度  $\mathbf{v}$ )由以下分析确定:任取待修正参数  $x_i$ , 已设定其变化范围为  $0.8x_{i0} \leq x_i \leq 1.2x_{i0}$ , 响应面构造过程中对参数归一化, 得到

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (16)$$

式中:  $x_{i\max} = 1.2x_{i0}$ ;  $x_{i\min} = 0.8x_{i0}$ ;  $\bar{x}_i$  为按试验设计方法将该参数分为不同水平后各水平参数平均值, 本例中将每个参数的设计空间均匀划分为 3 个水平 ( $0.8x_{i0}$ 、 $x_{i0}$  和  $1.2x_{i0}$ ), 则  $\bar{x}_i = x_{i0}$ , 可得  $-0.5 \leq \hat{x}_i \leq 0.5$ , 由此, 粒子位置  $\mathbf{x}$  和速度  $\mathbf{v}$  变动范围为  $-0.5 \leq x_i \leq 0.5$  和  $-0.5 \leq v_i \leq 0.5$ ; 同时, Linear-and-Gaussian 组合核支持向量机响应面构造过程中的 Gaussian 核参数  $\sigma = 0.5$  (设计空间半径)。搜索过程结束后, 将标准 PSO 算法和 IPSO 算法搜索得到的修正量  $\Delta \hat{\mathbf{x}}$  从归一化后的参数空间映射回原设计空间即得待修正参数的真实摄动量  $\Delta \mathbf{x}$ 。

修正后模型前 6 阶模态频率如图 6 所示, 用摄动后参数建立的待修正有限元模型  $M_1$  计算所得模态频率  $\mathbf{y}^1 = [f_1^1 \ f_2^1 \ \dots \ f_6^1]$  和响应面模型  $S_1$  在同组设计点处(即摄动后参数)计算所得模态频率  $\hat{\mathbf{y}}^1 = [\hat{f}_1^1 \ \hat{f}_2^1 \ \dots \ \hat{f}_6^1]$  高度接近, 证实了用响应面模型代替有限元模型计算不仅是可行的, 而且具有相当高的精确度。用蜂窝板原结构参数建立的基准有限元模型  $M_0$  计算所得模态频率值  $\mathbf{y}^0 = [f_1^0 \ f_2^0 \ \dots \ f_6^0]$  明显偏离待修正模型  $M_1$ , IPSO 算法搜索所得参数摄动量  $\Delta \mathbf{x}' = [\Delta \rho'_{t1} \ \Delta E'_{lx} \ \Delta \rho'_c \ \Delta G'_{lxy} \ \Delta E'_{ly} \ \Delta G'_{lyz}]$  计算得到新的设计点(修正后参数)  $\mathbf{x}' = [\rho'_{t1} \ E'_{lx} \ \rho'_c \ G'_{lxy} \ E'_{ly} \ G'_{lyz}]$ , 用响应面模型  $S_1$  计算所得修正后参数  $\mathbf{x}'$  处结构频率响应  $\hat{\mathbf{y}}' = [\hat{f}_1' \ \hat{f}_2' \ \dots \ \hat{f}_6']$  值与基准有限元模型  $M_0$  计算所得模态频率值  $\mathbf{y}^0 = [f_1^0 \ f_2^0 \ \dots \ f_6^0]$  几乎重合, 将修正后参数  $\mathbf{x}'$  代入待修正有限元模型  $M_1$  得到修正后模型  $M_2$ , 计算所得模态频率值  $\mathbf{y}^2 = [f_1^2 \ f_2^2 \ \dots \ f_6^2]$  与基准有限元模型  $M_0$  计算所得模态频率值  $\mathbf{y}^0 = [f_1^0 \ f_2^0 \ \dots \ f_6^0]$  近似度低于响应面模型, 但较修正前模型  $M_1$  有了明显改善, 证实了测试频段内修正的有效性。

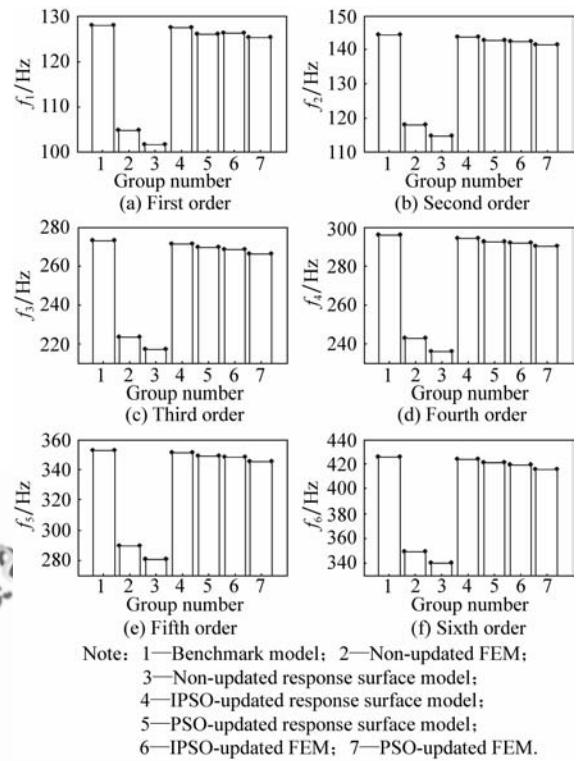


图 6 有限模型及响应面计算模态频率

Fig. 6 Modal frequencies of FEM and response surface

为检测修正后模型的预测能力, 用基准模型  $M_0$ 、待修正模型  $M_1$  和修正后模型  $M_2$  分别计算蜂窝板第 7~10 阶模态频率, 绘制条形图如图 7 所示, 可以看出  $M_2$  计算所得频率与  $M_0$  接近程度远高于  $M_1$ , 证实了修正后模型在测试频段外具有良好的预测能力。

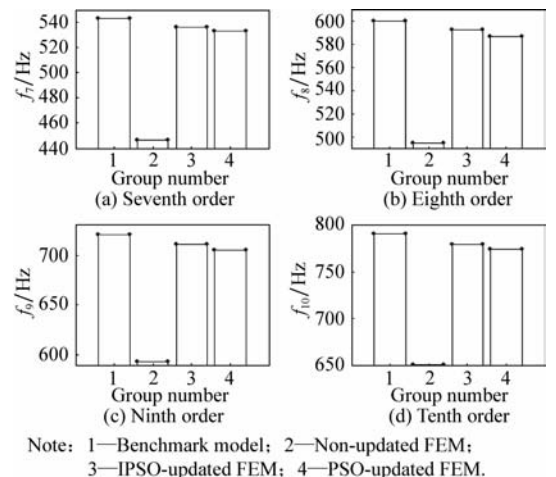


图 7 模态频率预测值

Fig. 7 Predicted values of modal frequencies



修正前后模态频率和结构参数计算值如表 4 和表 5 所示,可见修正后模型精度较修正前精度得到了明显提高。由图 6 和图 7 及表 4 和表 5 可知,IPSO 算法搜索所得结构参数摄动

量的精确度远高于标准 PSO 算法,且 IPSO 算法修正后模型计算频率较 PSO 算法修正频率更接近基准模型,证实了 IPSO 算法的有效性。

表 4 模态频率修正

Table 4 Modal frequency updating

Reappearance modal order	Original FEM	Non-updated FEM	Non-updated response surface	IPSO-updated response surface	PSO-updated response surface	IPSO-updated FEM	PSO-updated FEM
1	127.90	104.82	101.62	127.34	126.08	126.26	125.13
2	144.31	118.01	114.72	143.60	142.54	142.43	141.28
3	272.71	223.22	217.03	271.29	269.27	268.51	266.29
4	295.66	242.89	236.02	294.29	292.46	291.83	290.05
5	352.27	289.26	280.66	350.77	348.41	347.83	345.27
6	425.54	349.19	340.61	423.29	420.33	419.29	415.64
Prediction modal order	Original FEM	Non-updated FEM	IPSO-updated FEM	PSO-updated FEM			
7	542.60	446.81	536.63	532.79			
8	599.70	494.66	591.91	586.20			
9	720.24	593.04	709.82	704.55			
10	789.88	650.66	779.18	773.61			

表 5 结构参数对照

Table 5 Comparison of structure parameters

Structure parameters	$\rho_l / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E_{lx} / \text{GPa}$	$\rho_c / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$G_{lxy} / \text{GPa}$	$E_{ly} / \text{GPa}$	$G_{lyz} / \text{GPa}$
Value of benchmark FEM	1 560.0	130.50	31.20	5.24	9.98	3.49
Value of non-updated FEM	1 872.0	104.40	37.44	4.19	7.98	4.19
Value of IPSO-updated	1 581.8	128.28	31.95	5.44	9.72	3.65
Value of PSO-updated	1 592.3	127.94	32.86	5.58	9.15	3.72

标准 PSO 算法和 IPSO 算法修正结构参数过程的适应度函数收敛曲线如图 8 所示,可见两种算法均能在群体最优粒子的引导下逐渐向全局最优解靠近,修正后模型计算频率与实测频率之间的差值随着迭代搜索过程的进行不断减小。IPSO 算法中粒子在混沌搜索机制和变异算子的引导下能够不断调整粒子飞行方向,从而使得整个种群跳出局部最优飞向全局最优解,适应度函数收敛曲线值逐渐降低;而 PSO 算法中粒子由于受到算法自身搜索能力限制,其搜索效率和精度明显低于 IPSO 算法,同样证实了 IPSO 算法的有效性和必要性。

在蜂窝板有限元模型第 1023 号节点施加  $z$  方向幅值为  $f_z = 1 \text{ N}$  的简谐力(其频率范围为

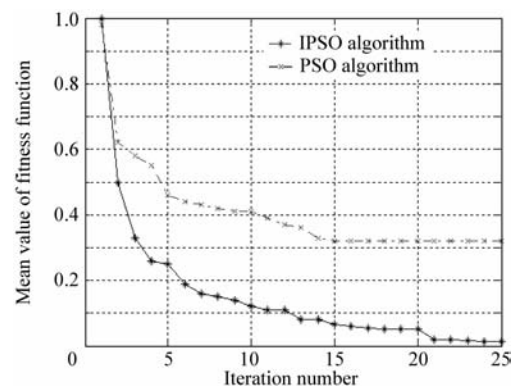


图 8 适应度函数收敛曲线

Fig. 8 Convergence curve of fitness function

100~800 Hz),分别获取原模型、摄动后模型及修正后模型 1023 号节点的原点频响函数(FRF)

和第 551 号节点的跨点频响应函数,如图 9 和图 10 所示,并计算了修正前后原点和跨点的幅值相关系数(如图 11 和图 12 所示)来评价修正后模型的有效性。类似于模态修正方法中振型判定准则(MAC),定义第  $i$  阶频率  $\omega_i$  的形状相关系数为

$$\chi_s(\omega_i) = \frac{|\mathbf{H}_{Ta}^T(\omega_i)\mathbf{H}_{An}(\omega_i)|^2}{(\mathbf{H}_{Ta}^T(\omega_i)\mathbf{H}_{Ta}(\omega_i))(\mathbf{H}_{An}^T(\omega_i)\mathbf{H}_{An}(\omega_i))} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{H}_{Ta}(\omega_i)$ 和 $\mathbf{H}_{An}(\omega_i)$ 分别为频率 $\omega_i$ 处的试验频响应函数和计算频响应函数; $\chi_s(\omega_i)=1$ 时,表示完全相关,但 $\chi_s(\omega_i)$ 对频响应函数的比例情况不敏感,即只要 $\mathbf{H}_{Ta}(\omega_i)=p\mathbf{H}_{An}(\omega_i)$ ( $p$ 为比例因子)就会有 $\chi_s(\omega_i)=1$ 。为克服形状相关系数的不足,定义第  $i$  阶频率  $\omega_i$  的幅值相关系数<sup>[16-18]</sup>为

$$\chi_a(\omega_i) = \frac{2|\mathbf{H}_{Ta}^T(\omega_i)\mathbf{H}_{An}(\omega_i)|^2}{\mathbf{H}_{Ta}^T(\omega_i)\mathbf{H}_{Ta}(\omega_i) + \mathbf{H}_{An}^T(\omega_i)\mathbf{H}_{An}(\omega_i)} \quad (18)$$

$\chi_a(\omega_i)$ 反映频响应函数不相关时的相关性,其相关性条件更加苛刻,仅当 $\mathbf{H}_{Ta}(\omega_i)=\mathbf{H}_{An}(\omega_i)$ 时才会有 $\chi_a(\omega_i)=1$ 。本例将 $\chi_a$ 作为检验修正后模型精确程度的标准,通过比较修正前后模型某点频响应函数与原模型该点频响应函数的幅值相关系数来判断修正效果。

由图 9 和图 10 可见修正后频响应函数曲线比修正前靠近实际曲线,同样证实了修正的可靠性。由图 11 和图 12 可见修正后模型频响应函数相关系数在多数频段接近 1,模型质量得到明显改善。

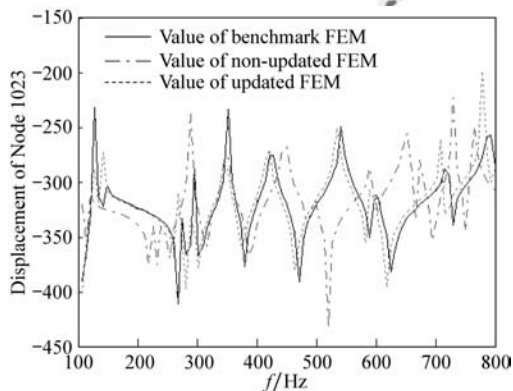


图 9 原点频响应函数曲线

Fig. 9 FRF curves of base point

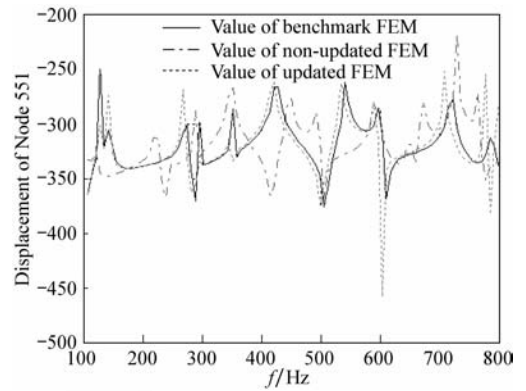


图 10 跨点频响应函数曲线

Fig. 10 FRF curves of cross point

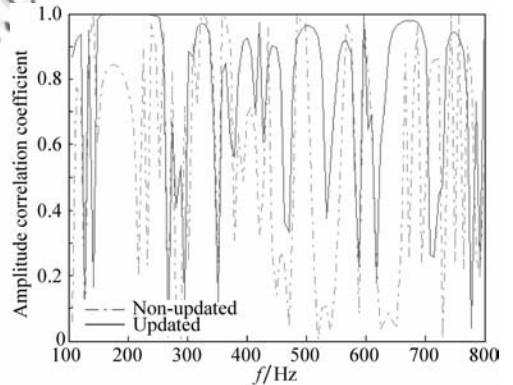


图 11 原点频响应函数幅值相关系数曲线

Fig. 11 Amplitude correlation coefficient curves of base point

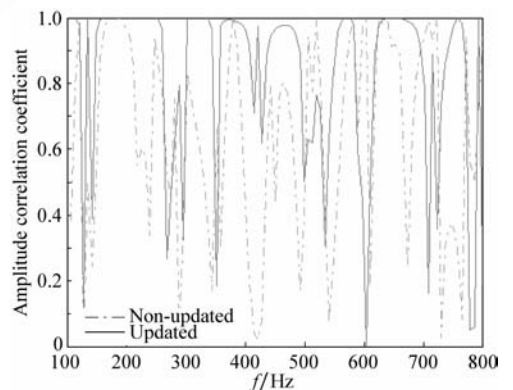


图 12 跨点频响应函数幅值相关系数曲线

Fig. 12 Amplitude correlation coefficient curves of cross point

## 4 结论

(1) 基于响应面的模型修正方法可以避免重

复调用有限元计算而导致的效率低下等缺点,有效提高了计算效率;由样本点试验数据建立的响应面模型计算所得非样本点结构响应与基准模型接近,证实了用响应面代替原模型进行计算的有效性和可靠性。对于只考虑线性因素的结构模态分析而言,Linear核和Linear-and-Gaussian组合核支持向量机响应面具有良好的拟合精度,说明了选取与实际结构相符合的响应面是保证拟合精度的重要条件。

(2) 基于MATLAB编程的响应面模型修正过程易于与各种形式优化算法结合,避免了ANSYS等有限元软件二次开发等问题,能以较少的工作量取得工程上可接受的计算精度;但响应面方法的局限性在于一组响应面只能模拟一组结构响应,因此将响应面模型中修正的结构参数代入原有限元模型(待修正模型)得到修正后的有限元模型,可进行进一步分析计算,提高了分析精度和效率。

(3) 基于分组控制策略的IPSO算法对优解群引入混沌搜索机制,并对劣解群引入变异算子,增加了种群的多样性,改进了算法性能。用该算法与Linear-and-Gaussian组合核支持向量机响应面结合对多铺层碳纤维蜂窝板的进行修正,修正后模型具有良好的复现和预测能力。对于工程中各种复杂的实际结构,用IPSO算法和响应面方法进行模型修正的基本流程已明确,应在研究实际问题的基础上对算法形式及响应面参数设置深入分析,进一步提高分析精度和效率。

## 参 考 文 献

- [1] 徐胜今,孔宪仁,王本利,等. 正交异性蜂窝夹层板动、静力学问题的等效分析方法[J]. 复合材料学报, 2000, 17(3): 92-95.  
Xu Shengjin, Kong Xianren, Wang Benli, et al. Method of equivalent analysis for statics and dynamics behavior of orthotropic honeycomb sandwich plates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(3): 92-95. (in Chinese)
- [2] Gibson L J, Ashby M F, Schajer G S. The mechanics of two-dimension cellular materials[J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1982, 382(1782): 25-42.
- [3] 朱安文,曲广吉,高耀南. 航天器结构模型优化修正方法的研究[J]. 宇航学报, 2003, 24(1): 107-110.  
Zhu Anwen, Qu Guangji, Gao Yaonan. Optimal algorithm of spacecraft structural model updating[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(1): 107-110. (in Chinese)
- [4] 任伟新,陈华斌. 基于响应面的桥梁有限元模型修正[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 73-78.  
Ren Weixin, Chen Huabin. Response-surface based on finite element model updating of bridge structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 73-78. (in Chinese)
- [5] 赵卫,刘济科. 基于支持向量回归的迭代序列响应面可靠度计算方法[J]. 机械强度, 2008, 30(6): 916-920.  
Zhao Wei, Liu Jike. Iterative sequence response surface method for reliability computation based on support vector regression[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(6): 916-920. (in Chinese)
- [6] Nello C, John S T. An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods[M]. London: Cambridge University Press, 2000: 112-120.
- [7] 秦玉灵,孔宪仁,罗文波. GA-PSO组合算法模型修正[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(4): 383-386.  
Qin Yuling, Kong Xianren, Luo Wenbo. The model updating by GA-PSO hybrid algorithm[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(4): 383-386. (in Chinese)
- [8] 林星,冯斌,孙俊. 混沌量子粒子群优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(10): 2610-2612.  
Lin Xing, Feng Bin, Sun Jun. Chaos quantum-behaved particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(10): 2610-2612. (in Chinese)
- [9] Chu H J, Chang L C. Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(9): 1024-1027.
- [10] 葛洪伟,靳文辉. 变异量子粒子群优化算法在系统辨识中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(29): 222-224.  
Ge Hongwei, Jin Wenhui. Application of quantum-behaved PSO algorithm with mutation operator in system parameters identification[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(29): 222-224. (in Chinese)
- [11] 安晓会,高岳林. 混合变异算子的自适应粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(S1): 28-30.  
An Xiaohui, Gao Yuelin. Adaptive particle swarm algorithm with hybrid mutation operator[J]. Computer Applications, 2008, 28(S1): 28-30. (in Chinese)
- [12] 罗亚军,牛红攀,徐卫秀,等. 安装蜂窝板动力学特性分析及主动控制试验研究[J]. 应用力学学报, 2006, 23(2): 267-270.  
Luo Yajun, Niu Hongpan, Xu Weixiu, et al. Studies on the dynamic properties and positive control of the honeycomb sandwich panel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(2): 267-270. (in Chinese)

- [13] 夏利娟, 金咸定, 汪痒宝. 卫星结构蜂窝夹层板的等效计算[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 999-1001.  
Xia Lijuan, Jin Xianding, Wang Yangbao. Equivalent analysis of honeycomb sandwich plates for satellite structure[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(7): 999-1001. (in Chinese)
- [14] 梁森, 陈花玲, 陈天宁, 等. 蜂窝夹芯结构面内等效弹性参数的分析研究[J]. 航空材料学报, 2004, 24(3): 26-31.  
Liang Sen, Chen Hualing, Chen Tianning, et al. Analytical study of the equivalent elastic parameters for a honeycomb core[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004, 24(3): 26-31. (in Chinese)
- [15] 费庆国, 张令弥, 李爱群, 等. 基于统计分析技术的有限元模型修正研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(3): 23-27.  
Fei Qingguo, Zhang Lingmi, Li Aiqun, et al. Finite element model updating using statistics analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(3): 23-27. (in Chinese)
- [16] 徐张明, 沈荣瀛, 华宏星. 基于频响函数相关性的灵敏度分析的有限元模型修正[J]. 机械强度, 2003, 25(1): 5-8.  
Xu Zhangming, Shen Rongying, Hua Hongxing. Updating finite element model by the sensitivity analysis of FRF correlation functions[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(1): 5-8. (in Chinese)
- [17] 徐张明, 高天明, 沈荣瀛, 等. 一种改进的利用频响函数进行有限元模型修正的方法[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 43-46.  
Xu Zhangming, Gao Tianming, Shen Rongying, et al. One improved FEM model update method by frequency response[J]. Vibration and Impact, 2002, 21(3): 43-46. (in Chinese)
- [18] 朱函函, 冯咬齐. 应用位移频响函数进行模型修正[J]. 宇航学报, 2002, 21(3): 43-46.  
Zhu Dangdang, Feng Yaoqi. Application research of finite element model improvement method by use of displacement frequency response functions[J]. Journal of Astronautics, 2002, 21(3): 43-46. (in Chinese)

#### 作者简介:

秦玉灵(1982—) 女, 博士研究生。主要研究方向: 卫星结构动力学及模型修正。

Tel: 0451-86402357

E-mail: erica2004ren@163.com

孔宪仁(1961—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 卫星结构动力学及热力学控制。

Tel: 0451-86402357

E-mail: kongxr@hit.edu.cn

罗文波(1968—) 男, 博士, 教授。主要研究方向: 卫星结构动力学及环境试验。

E-mail: luowb999@sohu.com

# Model Updating for Multi-layered Carbon Fiber Honeycomb Sandwich Panel

QIN Yuling<sup>1</sup>, KONG Xianren<sup>1,\*</sup>, LUO Wenbo<sup>2</sup>

1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100086, China

**Abstract:** The honeycomb sandwich panel is the main load-carrying structure of modern aircraft. Linear-and-Gaussian combined kernel function support vector machine (SVM) response surface and the group-control-based improved particle swarm optimization (IPSO) algorithm are proposed in this paper through an analysis of various response surfaces, and a finite element model (FEM) of the multi-layered carbon fiber honeycomb sandwich panel is constituted in ANSYS using SHELL91. The non-updated parameters are chosen by orthogonal design and *F*-test, which are then employed to constitute the Linear-and-Gaussian response surface to simulate the relationship between the structure parameters and the responses, and then verify the validity of the response surface model. The group-control-based IPSO algorithm is employed to update the non-updated parameters and the updated parameters are substituted into the non-updated FEM. A comparison of the modal frequencies of the non-updated and updated FEM and the benchmark FEM proves the reappearance and prediction ability of the updated FEM.

**Key words:** response surface; multi-layered carbon fiber honeycomb sandwich panel; combined kernel function support vector machine; group-control strategy; particle swarm optimization algorithm

**Received:** 2010-07-01; **Revised:** 2010-09-30; **Accepted:** 2010-11-15; **Published online:** 2010-11-30 17:43

**URL:** www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101130.1743.000.html **DOI:** CNKI:11-1929/V.20101130.1743.000

**Foundation item:** Micro Spacecraft System Technology Changjiang Scholars Innovation Team Development Plan(IRT0520)

\* **Corresponding author.** Tel.: 0451-86402357 E-mail: kongxr@hit.edu.cn