

文章编号:1674-8190(2013)03-292-07

复合材料加筋板结构优化设计的并行子空间法

程家林¹,冯玉龙^{1,2},姚卫星^{2,3}

(1. 中国航空工业集团公司 成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

(2. 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)

(3. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室,南京 210016)

摘要: 为对复合材料加筋板结构进行布局优化设计,提出并行子空间优化方法。该方法将整个优化问题分为筋条布局优化、筋条尺寸优化和铺层厚度优化三个并行的子空间优化问题,分别以筋条型式、数量、尺寸和铺层厚度为设计变量;每个子问题都独立进行优化计算,优化后将所有结果综合协调,更新设计变量值并重复整个优化过程,直到满足收敛条件。通过三个典型算例验证,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

中图分类号:TB332

文献标识码:A

Concurrent Subspace Optimum Design Method for Composite Stiffened Panel

Cheng Jialin¹, Feng Yulong^{1,2}, Yao Weixing^{2,3}

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd., Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610092, China)

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

(3. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A concurrent subspace optimum design method is proposed for the optimization of composite stiffened panel. It divides the entire optimization into three sub-optimizations, that is layout optimization, size optimization and ply optimization, and the variables of them are the form of the stiffeners, the size of stiffeners and the ply thickness. All the sub-optimizations are solved independently. Once the three sub-optimizations finished, the values of the variables are reset according to the optimization results, and then to repeat all of the above processes until the convergence requirement is meet. Three optimization designs of composite stiffened panels are conducted to demonstrate the effectiveness.

Key words: composite material; stiffened panel; layout optimization; concurrent subspace optimization

0 引言

复合材料加筋板结构承载能力强、重量轻,在

航空航天结构中的应用日益广泛,其结构布局优化设计对减轻飞机重量具有重要意义。

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,国内外研究者对此开展了广泛研究。刘克龙等^[1]运用低自由度协同优化方法对机翼气动结构进行了多学科设计优化。M. Blair等^[2]将快速建模方法应用于翼

收稿日期:2013-03-26; 修回日期:2013-05-18

基金项目:国家自然科学基金(11202098)

教育部长江学者创新团队项目(IRT0968)

江苏高校优势学科建设工程资助项目

通信作者:姚卫星,wxxyao@nuaa.edu.cn

面结构的布局优化设计。张铁亮等^[3]采用试验设计建立代理模型的方法实现了加筋板的布局优化。S. Nagendra 等^[4]应用改进的遗传算法对加筋板结构进行优化设计。J. Fatemi 和 J. H. Kang 等^[5-6]也在加筋板结构设计优化中用到了遗传算法。L. Lanzani 等^[7]利用神经网络对复合材料加筋板进行优化。李烁等^[8]应用神经网络对复合材料帽型加筋板进行优化。L. Berke 等^[9]利用人工神经网络优化飞机翼面的结构布局。R. Rikards 等^[10]将代理模型技术应用到加筋板结构的设计优化中。赵群等^[11]提出了一种基于压弯刚度的复合材料加筋板布局优化设计。W. Liu 等^[12]提出了一种基于程序包 VICONOPT 的复合材料加筋板优化方法。吴莉莉等^[13]提出了加筋板稳定性约束下的二级协同优化算法。

上述优化方法,基本可解决连接变量和离散变量耦合的问题,但当变量空间较大时,通常会产生非常庞大的计算量。对此,本文提出一种并行子空间优化方法,用于减小整个优化问题的求解规模,实现布局、尺寸和铺层厚度的综合优化设计。

1 优化问题

复合材料加筋板结构布局优化的设计变量包括: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

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

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; $\lambda(\mathbf{X})$ 为结构屈曲因子; λ^* 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。

2 并行子空间优化方法

将复合材料加筋板布局优化问题分为筋条布局优化、筋条尺寸优化和铺层厚度优化三个子问

题,相应地将设计变量也分为三类,三个子问题在各自的子空间进行优化,优化流程如图 1 所示,图中: L_L 和 L_U 为筋条布局变量 L 的下限值 and 上限值; B_L 和 B_U 为筋条尺寸变量 B 的下限值 and 上限值; T_L 和 T_U 为铺层厚度变量 T 的下限值 and 上限值; $\mathbf{X}^{(n)}$ 为第 n 次迭代过程的变量值; W 为结构重量; λ 为结构屈曲因子; λ^* 为临界屈曲因子; $[\sigma_i]$ 和 $[\varepsilon_i]$ 为材料的许用应力和许用应变; $L_e^{(n)}$ 、 $B_e^{(n)}$ 和 $T_e^{(n)}$ 为并行优化后的变量值; $\mathbf{W}^{(n)}$ 为一个向量,包含三个子优化问题优化后的结构重量; e 为收敛精度; \mathbf{X}_δ 为变量的改变量。

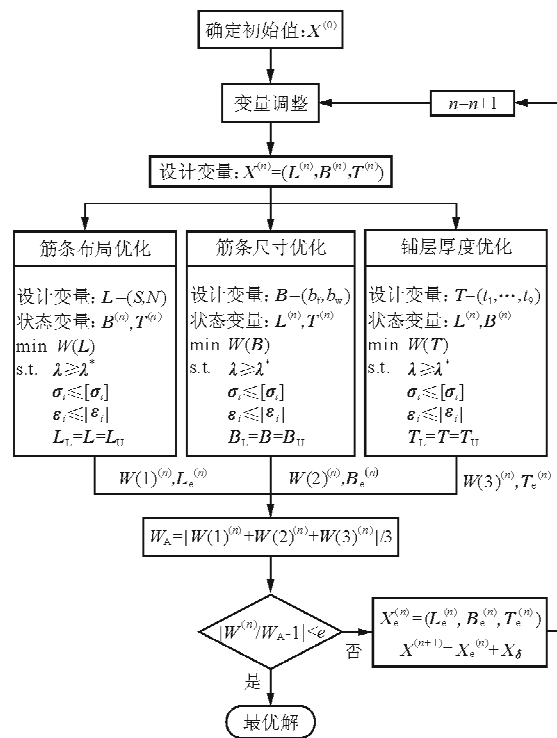
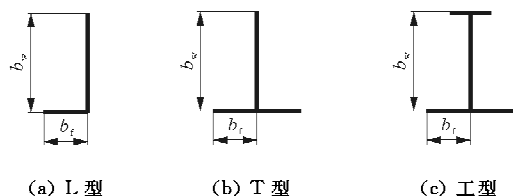


图 1 优化流程

Fig. 1 Optimization process

2.1 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。六种筋条截面形状及其尺寸规定如图 2 所示。



(a) L 型

(b) T 型

(c) 工型

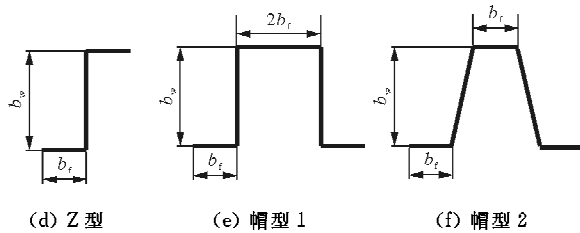


图 2 筋条截面形状

Fig. 2 Sectional shape of ribs

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。因为组合数目不大,且是离散变量,所以筋条布局优化的优化方法采用枚举法,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,取重量最轻的结果为最优解。

2.2 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试验设计法生成变量 b_r 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; ϵ_1 为收敛精度。

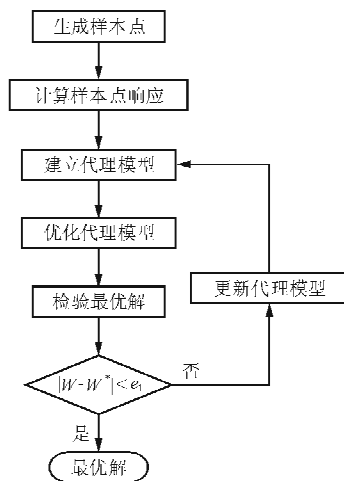


图 3 尺寸优化设计流程

Fig. 3 Size optimization design process

2.3 铺层厚度优化

在整个布局优化过程中,加筋板蒙皮铺层为 $[45_{i_1}/0_{i_2}/-45_{i_1}/90_{i_3}]_s$,筋条水平缘条铺层为 $[45_{i_4}/0_{i_5}/-45_{i_4}/90_{i_6}]_s$,筋条垂直缘条铺层为 $[45_{i_7}/0_{i_8}/-45_{i_7}/90_{i_9}]_s$ 。整个加筋板结构铺层厚度变量 $T=(t_1, \dots, t_9)$ 。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。

2.4 子空间优化结果的协调

一轮优化结束后若三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,进行循环计算。三个子空间优化后以结构重量最接近为目标调整下一步的迭代值。每一个子空间都对结构重量有一定程度的优化,若优化后重量低于三个优化结果的平均值,则减少该子空间变量的变化量,反之增加。通过改变子空间的变量变化值调整每一个子空间优化后的结构重量与优化后重量平均值的差异,进而确定下一步迭代的变量值。这样既保证了优化效率又保证了整个优化过程的收敛性。

图 1 中的变量改变量 $X_s=(L_s, B_s, T_s)$,定义如下

$$\begin{cases} L_s = H(1) \times (L^{(n)} - L_e^{(n)}) \\ B_s = H(2) \times (B^{(n)} - B_e^{(n)}) \\ T_s = H(3) \times (T^{(n)} - T_e^{(n)}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: H 为步长,通过对多个算例的探索,建议

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

$$\text{式中: } W_\Delta = \frac{W_A - W^{(n)}}{W_A}$$

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,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

表4 最终优化结果

Table 4 Final optimization results

| 参数名称 | 优化结果 | 参数名称 | 优化结果 |
|----------|-------|-----------|--------|
| S | 帽型1 | b_t/mm | 16.260 |
| N/根 | 3 | λ | 1.016 |
| b_w/mm | 31.35 | W/kg | 0.692 |

表5 优化后的铺层厚度

Table 5 Optimized thickness of plies

| 零件 | $t_{\pm 45}/mm$ | t_0/mm | t_{90}/mm |
|------|-----------------|----------|-------------|
| 蒙皮 | 0.224 | 0.270 | 0.220 |
| 水平缘条 | 0.130 | 0.130 | 0.130 |
| 垂直缘条 | 0.130 | 0.130 | 0.130 |

表6 优化前后结果对比

Table 6 Comparison of before and after optimization

| 对比项目 | 试验1 | 试验2 | 优化后 |
|---------|-------|-------|-------|
| 失效载荷/N | 222 | 172 | 224 |
| 结构重量/kg | 1.039 | 0.893 | 0.692 |

3.2 算例二

3.2.1 问题描述

以文献[15]中的加筋板试验件为模型进行优化计算。试验件结构模型如图6所示,加筋板有4根筋条,筋条下缘条宽度为26 mm,上缘条宽度为10 mm,缘条高度为14 mm,材料属性如表7所示。初始铺层情况为:蒙皮 $[(\pm 45)_2/0_3/\pm 45/0_2/45_2/-45_2/90_4]_s$;筋条 $[(\pm 45)_2/0/45/-45/90_3]_s$ 。加筋板夹持端固支,两侧边为自由边,加载端简支。对试件施加轴压载荷,测量失稳临界载荷值。试验结果和理论分析结果如表8所示。

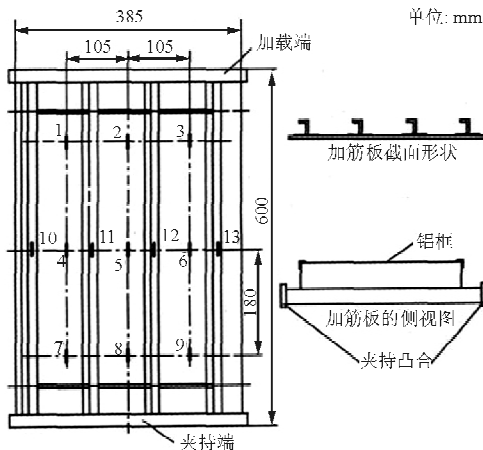


图6 加筋板结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of stiffened panel

表7 材料属性

Table 7 Material properties

| 材料参数 | 数值 | 材料参数 | 数值 |
|-----------|--------|---------------------------|----------------------|
| E_1/GPa | 119.50 | μ | 0.3 |
| E_2/GPa | 8.80 | $\rho/(kg \cdot mm^{-3})$ | 1.5×10^{-6} |
| G/GPa | 5.18 | | |

表8 试验结果与理论分析结果

Table 8 Test and theoretical analysis results

| 重量/kg | 屈曲失稳载荷 P/kN | | |
|-------|-------------|--------------------|------|
| | 试验 | 计算 ^[15] | 本文计算 |
| 1.793 | 290 | 277 | 283 |

3.2.2 优化计算

布局变量的取值范围如表9所示,载荷取试验结果, $N_x = 753.2 N/mm$,临界屈曲因子 $\lambda^* = 1.0$ 。

表9 布局变量的取值范围

Table 9 Value range of layout variables

| 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 | {1,2,3,4,5} |
| 连续变量 | 垂直缘条宽度 b_w/mm | 5~50 |
| | 水平缘条宽度 b_t/mm | 5~15 |
| | 单层厚度最小值 t_{min}/mm | 0.13 |
| | 单层厚度最大值 t_{max}/mm | 6.50 |

结构重量迭代过程如图7所示。布局优化后的主要参数如表10所示,优化后的铺层厚度如表11所示。优化前后的结果对比如表12所示,在保证承载能力不变的条件下,使用并行子空间法进行布局优化可以有效地减轻结构重量。

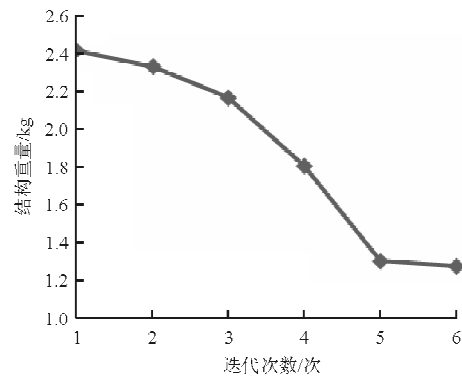


图7 重量迭代过程

Fig. 7 Iterative process of weight

表 10 最终优化结果

Table 10 Final optimization results

| 参数名称 | 优化结果 | 参数名称 | 优化结果 |
|-----------|-------|-----------|-------|
| S | 帽型 1 | b_t /mm | 9.730 |
| N/根 | 5 | λ | 1.016 |
| b_w /mm | 28.56 | W/kg | 1.442 |

表 11 优化后的铺层厚度

Table 11 Optimized thickness of plies

| 零件 | $l_{\pm 45}$ /mm | l_0 /mm | l_{90} /mm |
|------|------------------|-----------|--------------|
| 蒙皮 | 0.130 | 0.997 | 0.130 |
| 水平缘条 | 0.240 | 0.130 | 0.130 |
| 垂直缘条 | 0.161 | 0.130 | 0.130 |

表 12 优化前后结果对比

Table 12 Comparison of before and after optimization

| 对比项目 | 优化前 | 优化后 |
|---------|-------|-------|
| 失效载荷/kN | 290 | 290 |
| 结构重量/kg | 1.793 | 1.442 |

3.3 算例三

3.3.1 问题描述

以文献[16]中 3.4.1 节第三个算例的加筋板为模型进行优化计算。结构模型如图 8 所示。

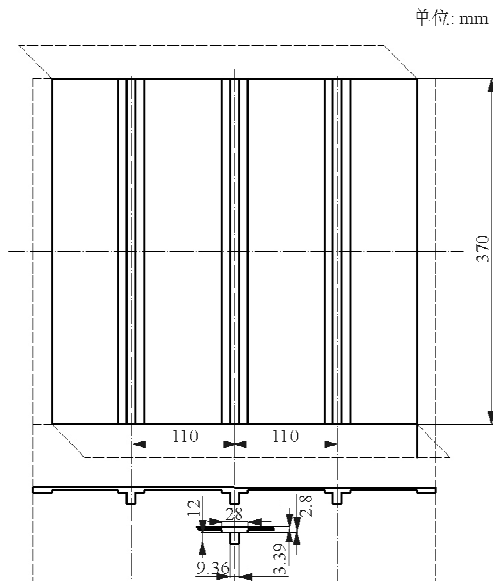


图 8 加筋板结构模型

Fig. 8 Structure model of stiffened panel

加筋板形状为矩形,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 13 所示,材料许用应变 $[\epsilon_1]=3500\mu\epsilon$, $[\epsilon_2]=3500\mu\epsilon$, $[\gamma_{12}]=4500\mu\epsilon$ 。结构初始屈曲因子为 0.97278,初始重量为 1.136 kg。

表 13 材料属性

Table 13 Material properties

| 材料参数 | 数值 | 材料参数 | 数值 |
|------------|-------|-------------------------------|----------------------|
| E_1 /GPa | 125.0 | μ | 0.33 |
| E_2 /GPa | 7.2 | ρ /(kg·mm ³) | 1.5×10^{-6} |
| G/GPa | 4.7 | | |

3.3.2 优化计算

布局变量的取值范围如表 14 所示。临界屈曲因子 $\lambda^*=1.0$ 。

表 14 布局变量的取值范围

Table 14 Value range of layout variables

| 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 /mm | 20~30 |
| | 水平缘条宽度 b_t /mm | 6~18 |
| | 单层厚度最小值 l_{min} /mm | 0.117 |
| | 单层厚度最大值 l_{max} /mm | 5.000 |

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 9 所示。布局优化后的主要参数如表 15 所示,优化后的铺层厚度如表 16 所示。在相同的载荷下,优化前后的屈曲因子和结构重量对比如表 17 所示,从表 17 可以看出,在保证承载能力不变的情况下,结构重量有较大幅度地减少。

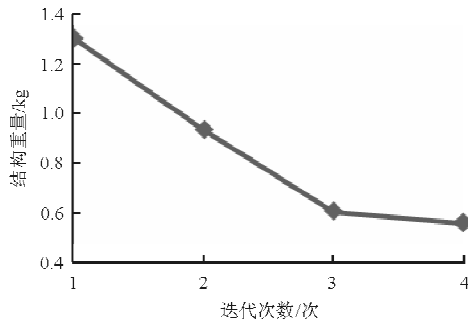


图9 重量迭代过程

Fig. 9 Iterative process of weight

表15 最终优化结果

Table 15 Final optimization results

| 参数名称 | 优化结果 | 参数名称 | 优化结果 |
|-----------|-------|-----------|-------|
| S | 帽型1 | b_t /mm | 6.700 |
| N/根 | 5 | λ | 1.016 |
| b_w /mm | 20.53 | W/kg | 1.442 |

表16 优化后的铺层厚度

Table 16 Optimized thickness of plies

| 零件 | $t_{\pm 45}$ /mm | t_0 /mm | t_{90} /mm |
|------|------------------|-----------|--------------|
| 蒙皮 | 0.117 | 0.273 | 0.271 |
| 水平缘条 | 0.117 | 0.281 | 0.117 |
| 垂直缘条 | 0.117 | 0.119 | 0.117 |

表17 优化前后结果对比

Table 17 Comparison of results between before and after optimization

| 对比项目 | 优化前 | 优化后 |
|----------------|-------|-------|
| 屈曲因子 λ | 0.973 | 1.106 |
| 结构重量/kg | 1.136 | 0.566 |

4 结论

本文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三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。算例结果表明该优化方法不仅合理而且具有很好的优化效果。

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. (in Chinese)

- [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. (in Chinese)
- [4] Nagendra S, Jestin D, Gurdal Z, et al. Improved genetic algorithm for the design of stiffened composite panels[J]. Computers & 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 II, 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 panels 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 Compositae Sinica, 2005, 22(5): 134-140. (in Chinese)
- [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 II, 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. (in Chinese)
- [12] Liu W, Butler R, Mileham A R, et al. Optimum design, experimental testing and post-buckling analysis of thick composite stiffened panel[R]. AIAA-2005-1826, 2005.
- [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. (in Chinese)

(下转第305页)

- method using iSGIIT [J]. Microcomputer Information, 2009(34): 179-181. (in Chinese)
- [9] Donea J, Giuliani S, Halleux J P. An arbitrary lagrangian-eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1982, 33(1-3): 689-723.
- [10] Martin Larcher, Giampiero Manara. Influence of air damping on structures especially glass[R]. JRC 57330, Ispra(Italy); European Commission, 2010: 9-27.
- [11] R. 克拉夫, J. 彭津. 结构动力学[M]. 王光远, 等译. 北京: 高等教育出版社, 1981: 103-140.
Clough R, Penzien J. Dynamics of structures[M]. Wang Guangyuan, et al. Translation. Beijing: Higher Education Press, 1981: 103-140. (in Chinese)
- [12] Sondipon Adhikari. Damping models for structural vibration[D]. UK: Trinity College, Cambridge University, 2000.
- [13] LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. California; Livemore Software Technology Corporation, 2007: 137-170, 587-596.
- [14] 王敏, 朱国荣, 孔祥龙, 等. 用 Hooke-Jeeves 方法进行水文地质参数寻优的研究[J]. 地质论评, 2005, 51(6): 724-727.
Wang Min, Zhu Guorong, Kong Xianglong, et al. A study of optimization for hydrogeologic parameters with hooke-jeeves methods[J]. Geological Review, 2005, 51(6): 724-727. (in Chinese)

作者简介:

刘超(1987—)男, 硕士研究生. 主要研究方向: 飞行器结构设计。

孙秦(1956—)男, 教授, 博导. 主要研究方向: 飞行器设计。

(编辑: 马文静)

(上接第 284 页)

- [3] Fitzgibbon T F. Wing fold actuator system for aircraft: USA, 5310138[P]. 1994-03-10.
- [4] 李元科. 工程最优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Li Yuanke. Optimization principles and techniques for engineering design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [5] 李育锡. 机械设计基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 99-102.
Li Yuxi. Fundamentals of machine design [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 99-102. (in Chinese)

作者简介:

陈晓亮(1986—), 男, 硕士研究生. 主要研究方向: 飞行器结构设计。

赵美英(1962—), 女, 教授, 博导. 主要研究方向: 飞行器结构设计、复合材料结构分析与设计、智能材料结构设计等。

孟毛毛(1988—), 男, 硕士研究生. 主要研究方向: 复合材料连接结构分析与设计。

万小朋(1962—), 男, 教授, 博导. 主要研究方向: 飞行器总体设计、飞行器结构设计。

(编辑: 马文静)

(上接第 298 页)

- [14] 童贤鑫, 高之恒, 关德新. 帽型复合材料加筋叠层板轴压稳定性分析与试验研究[J]. 航空学报, 1988, 9(5): 255-259.
Tong Xianxin, Gao Zhiheng, Guan Dexin. Analytical and experimental investigations on stability of composite hat-stiffened panels under compression[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(5): 255-259. (in Chinese)
- [15] 穆朋刚, 万小朋, 赵美英. 复合材料加筋壁板稳定性分析研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(9): 1190-1193.
Mu Penggang, Wan Xiaopeng, Zhao Meiyang. A study of the stability of composite stiffened plates[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(9): 1190-1193. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)

作者简介:

程家林(1965—), 男, 研究员. 主要研究方向: 飞行器总体设计、结构强度设计。

冯玉龙(1988—), 男, 硕士研究生, 助理工程师. 主要研究方向: 飞机结构设计、复合材料结构设计。

姚卫星(1957—), 男, 教授, 博导. 主要研究方向: 飞行器总体气动-结构的综合设计技术、结构抗疲劳设计、复合材料结构设计、可靠性工程等。

(编辑: 马文静)