

文章编号: 1000-4750(2013)02-0019-05

# 黏弹性复合材料结构的多目标优化设计

杨加明, 盛 佳, 张义长

(南昌航空大学飞行器工程学院, 南昌 330063)

**摘 要:** 黏弹性复合材料具有良好的阻尼性能, 但黏弹性层的存在对黏弹性复合材料结构的强度性能会有所影响, 黏弹性复合材料结构只有同时兼备良好的阻尼和强度才能满足工程要求。该文在经典层合板及小挠度弯曲理论基础上, 运用 Ritz 法建立黏弹性复合材料结构应变能损耗因子和横向均布荷载作用下初始破坏强度计算模型。提出新的遗传算法适应度函数构造办法, 克服了多目标优化问题中优化结果的偏移现象, 对黏弹性复合材料结构进行单目标和双目标优化设计。优化结果表明: 改进的遗传算法适用于黏弹性复合材料结构阻尼和强度性能的优化设计, 而且多目标优化设计可以权衡复合结构的阻尼性能和强度性能, 有利于发挥黏弹性复合材料结构良好的整体性能。

**关键词:** 复合材料; 黏弹性层; 优化设计; 阻尼性能; 强度性能

**中图分类号:** TB33      **文献标志码:** A      **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.09.0603

## MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION DESIGN OF COMPOSITE STRUCTURES WITH INTERLEAVED VISCOELASTIC LAYERS

YANG Jia-ming, SHENG Jia, ZHANG Yi-chang

(School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** Composite structures with interleaved viscoelastic layers have favorable damping properties, but viscoelastic layers may weaken their strength. They can meet the needs of engineering requirements when composite structures with interleaved viscoelastic layers have both favorable damping properties and higher strength properties. Based on the classical laminate theory or the small deflection theory, mathematical models are built for a loss factor of strain energy and first-ply failure strength under uniformly lateral distributed loads by the Ritz method. A novel function of adaptive genetic algorithms is proposed to overcome the excursion phenomenon of multiobjective optimization. The optimization designs of single objective and multiobjective are investigated for the materials. The numerical results show that the modified genetic algorithm is available for optimization design of a loss factor and strength. The multiobjective optimization design is used to balance their properties between damping and strength. It is beneficial to improve the multiple mechanical properties of composite structures with interleaved viscoelastic layers.

**Key words:** composite structures; viscoelastic layers; optimization design; damping property; strength property

黏弹性复合材料结构是由复合材料层和黏弹性阻尼材料层复合而成的一种复合材料结构形式。由于黏弹性层的存在, 黏弹性复合材料结构不仅具有复合材料层合板的高比强度、高比刚度的特点,

而且还具有良好的阻尼性能, 近年来越来越受到航空航天领域的关注<sup>[1]</sup>。同时, 加入黏弹性阻尼层对整个黏弹性复合材料结构的强度有所影响, 黏弹性复合材料结构只有同时具有良好的强度性能和阻

收稿日期: 2011-09-13; 修改日期: 2011-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(10962006); 南昌航空大学“无损检测技术”教育部重点实验室基金项目(ZD201129006)

通讯作者: 杨加明(1963—), 男, 江西南昌人, 教授, 博士, 从事复合材料结构力学研究(E-mail: yjm396@hotmail.com).

作者简介: 盛 佳(1987—), 男, 江西景德镇人, 硕士生, 从事复合材料力学研究(E-mail: 275762389@qq.com);

张义长(1986—), 男, 江西九江人, 硕士, 从事遗传算法及结构力学研究(E-mail: zwl376519306@yahoo.com.cn).

尼性能,才能满足工程要求。黏弹性复合材料的阻尼性能和强度性能受多种因素的影响,对黏弹性复合材料结构进行多目标优化设计有利于发挥该结构的良好力学性能。

黏弹性复合材料结构的初始设计变量较多,公式转换繁杂。遗传算法是一种并行搜索全局优化算法,具有很强的鲁棒性,适合多目标优化设计,目前已逐渐应用于复合材料的优化设计<sup>[2-3]</sup>中。

结构的阻尼性能可以用应变能损耗因子来表征<sup>[4]</sup>。Berthelot<sup>[5-6]</sup>使用能量法和有限元法计算了黏弹性复合材料结构的应变能损耗因子,并进行了实验对照。Kristensen 等<sup>[7]</sup>通过 Timoshenko 梁理论及二维有限元模型对带有约束阻尼层的复合材料梁的阻尼性能及损耗因子进行了分析。李明俊<sup>[8]</sup>对黏弹性层厚度及位置变化对黏弹性复合材料结构阻尼性能的影响进行了实验研究。作者<sup>[9]</sup>通过 Ritz 法对四边夹紧约束下对称黏弹性复合材料结构的应变能进行了详细讨论和计算。复合材料层合板的强度分析及其优化设计已取得了研究成果<sup>[10-11]</sup>,但黏弹性复合材料的破坏分析及强度理论方面的研究国内还少有报道。

本文在经典层合板及小挠度弯曲理论基础上,运用 Ritz 法建立黏弹性复合材料结构应变能损耗因子和均布荷载作用下初始破坏强度计算模型,运用遗传算法对其进行单目标和双目标优化设计,以发挥黏弹性复合材料结构良好的阻尼性能和强度性能。

## 1 黏弹性复合材料结构应力-应变关系

如图 1 所示为三层黏弹性复合材料结构,其上下两层为正交各向异性单层面板,厚度为  $e/2$ ,材料主方向与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ 。黏弹性阻尼层夹杂其中,厚度为  $e_0$ 。整体结构长为  $a$ ,宽为  $b$ ,高为  $h$ 。

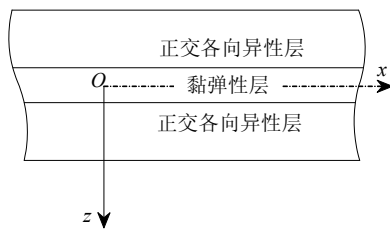


图 1 三层黏弹性复合材料结构  
Fig.1 The composite structure with an interleaved viscoelastic layer

复合结构板的挠度函数  $w(x, y)$  用双重 Fourier 级数和梁振型函数来表示<sup>[5]</sup>:

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{mn} X_m(x) Y_n(y) \quad (1)$$

其中:  $A_{mn}$  为待定系数;  $X_m$  和  $Y_n$  表示梁的振型函数,当四边夹紧时,其定义如下<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned} X_m(x) &= \sin(\lambda_m \xi) - \sinh(\lambda_m \xi) - \alpha_m \cos(\lambda_m \xi) + \\ &\quad \alpha_m \cosh(\lambda_m \xi), \\ Y_n(y) &= \sin(\lambda_n \zeta) - \sinh(\lambda_n \zeta) - \alpha_n \cos(\lambda_n \zeta) + \\ &\quad \alpha_n \cosh(\lambda_n \zeta). \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\xi = x/a$ ,  $\zeta = y/b$ ; 系数  $\lambda_i$  和  $\alpha_i$  由下面 2 个方程确定<sup>[9]</sup>:

$$1 - \cos(\lambda_i) \cosh(\lambda_i) = 0, \quad \alpha_i = \frac{\sin(\lambda_i) - \sinh(\lambda_i)}{\cos(\lambda_i) - \cosh(\lambda_i)} \quad (3)$$

在经典层合板理论中,中面位移  $u_0 = 0$ ,  $v_0 = 0$ ,层合板小挠度应变场可表示为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (4)$$

复合材料面层本构关系为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{44} & S_{45} \\ S_{45} & S_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:  $S_{ij}$  为复合材料层的柔度系数;  $\bar{Q}_{ij}$  为复合材料层的刚度系数,可由复合材料各方向弹性常数及纤维铺设角度求出。

对于黏弹性阻尼层,视为各向同性材料,其本构关系为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^v \\ \sigma_y^v \\ \tau_{xy}^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}^v & Q_{12}^v & 0 \\ Q_{12}^v & Q_{22}^v & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66}^v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \gamma_{yz}^v \\ \gamma_{xz}^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{44}^v & 0 \\ 0 & S_{55}^v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{yz}^v \\ \tau_{xz}^v \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $Q_{ij}^v$  和  $S_{ij}^v$  分别为黏弹性层的刚度系数和柔度系数,可由黏弹性层的弹性常数求出。

假设体力分量  $f_x = f_y = 0$ , 根据空间平衡方程:

$$\frac{\partial \tau_{xz}^i}{\partial z} = -\frac{\partial \sigma_x^i}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}^i}{\partial y} \quad i=\text{uni}, \text{v} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tau_{yz}^i}{\partial z} = -\frac{\partial \tau_{xy}^i}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_y^i}{\partial y} \quad i=\text{uni}, \text{v} \quad (10)$$

其中: uni 表示正交各向异性单层; v 表示黏弹性层。根据式(9)和式(10)就可以求出  $\tau_{xz}$  和  $\tau_{yz}$ 。

## 2 黏弹性复合材料结构应变能损耗因子计算

由于  $\varepsilon_z = 0$ , 黏弹性复合材料结构的总应变能可表示为:

$$U = \iiint_V \left[ \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{xz} \gamma_{xz}) \right] dx dy dz \quad (11)$$

考虑横向切应力-应变能, 黏弹性复合材料结构各单层板应变能分量为:

$$U_{11}^i = \iiint_{V^i} \frac{1}{2} \sigma_{11}^i \varepsilon_{11}^i dx dy dz, \quad U_{22}^i = \iiint_{V^i} \frac{1}{2} \sigma_{22}^i \varepsilon_{22}^i dx dy dz,$$

$$U_{12}^i = \iiint_{V^i} \frac{1}{2} \sigma_{12}^i \varepsilon_{12}^i dx dy dz, \quad U_{66}^i = \iiint_{V^i} \frac{1}{2} \sigma_{66}^i \varepsilon_{66}^i dx dy dz,$$

$$U_{13}^i = U_{xz}^i = \iiint_{V^i} \frac{1}{2} \tau_{xz}^i \gamma_{yz}^i dx dy dz,$$

$$U_{23}^i = U_{yz}^i = \iiint_{V^i} \frac{1}{2} \tau_{yz}^i \gamma_{yz}^i dx dy dz, \quad i=\text{uni}, \text{v} \quad (12)$$

黏弹性复合材料结构损耗的应变能  $\Delta U$  为:

$$\Delta U = \Delta U^{\text{uni}} + \Delta U^{\text{v}} \quad (13)$$

$\Delta U^{\text{uni}}$  为正交各异性单层损耗的能量, 其表达式为:

$$\begin{aligned} \Delta U^{\text{uni}} = & \eta_{11} (U_{11}^{\text{uni}(1)} + U_{11}^{\text{uni}(2)}) + 2\eta_{12} (U_{12}^{\text{uni}(1)} + \\ & U_{12}^{\text{uni}(2)}) + \eta_{22} (U_{22}^{\text{uni}(1)} + U_{22}^{\text{uni}(2)}) + \\ & \eta_{66} (U_{66}^{\text{uni}(1)} + U_{66}^{\text{uni}(2)}) + \eta_{13} (U_{13}^{\text{uni}(1)} + U_{13}^{\text{uni}(2)}) + \\ & \eta_{23} (U_{23}^{\text{uni}(1)} + U_{23}^{\text{uni}(2)}) \end{aligned} \quad (14)$$

$\Delta U^{\text{v}}$  为黏弹性层损耗的能量, 其表达式为:

$$\Delta U^{\text{v}} = \eta_{\text{v}} (U_{11}^{\text{v}} + 2U_{12}^{\text{v}} + U_{22}^{\text{v}} + U_{66}^{\text{v}} + U_{13}^{\text{v}} + U_{23}^{\text{v}}) \quad (15)$$

其中:  $\eta_{ij}$  为正交各异性单层的损耗因子;  $\eta_{\text{v}}$  为黏弹性材料层的损耗因子。

整体黏弹性复合材料结构的阻尼性能用损耗因子表示<sup>[5]</sup>:

$$\eta = \Delta U / U \quad (16)$$

具体求解步骤是: 用 Ritz 法求出系数  $A_{mn}$  的值,

结合式(1)~式(3)写出挠度表达式  $w(x, y)$ , 再代入式(4)~式(10)求出黏弹性复合材料结构各层的应变及应力, 通过式(11)求出结构总的应变能。通过式(12)求出复合结构各个方向上的应变能, 代入式(14)和式(15)求出黏弹性层和正交各向异性层的各能量损耗值, 把所求结果代入式(16)即可求出损耗因子  $\eta$ 。

## 3 黏弹性复合材料结构初始强度计算

这里主要是建立黏弹性复合材料整体结构在横向均布荷载作用下的初始破坏强度计算式。

前面已经阐述了用 Ritz 法求解黏弹性复合材料结构的挠度函数。在挠度函数已知的情况下, 可以写出复合结构的应力、应变的分布函数, 代入合适的强度理论即可判断出复合结构所处的状态, 找出复合结构的最危险点, 确定极限横向均布荷载。本文应用 Tsai-Hill 强度理论分析黏弹性复合材料结构受横向均布荷载作用下的弯曲强度问题。

Tsai-Hill 强度理论考虑了各个应力分量之间的相互影响, 其表达式为:

$$\text{F.I.} = \left( \frac{\sigma_1}{X} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_2}{Y} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{S} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^2} < 1 \quad (17)$$

其中: 当  $\sigma_1$  为拉应力时,  $X$  为纤维方向拉伸极限强度  $X_t$ ; 当  $\sigma_1$  为压应力时,  $X$  为纤维方向压缩极限强度  $X_c$  (绝对值)。当  $\sigma_2$  为拉应力时,  $Y = Y_t$ ; 当  $\sigma_2$  为压应力时,  $Y = Y_c$ 。  $S$  为面内剪切极限强度。

应用坐标转换公式, 可以得到黏弹性复合材料结构各层主方向上的应力函数表达式。

$$\sigma_1 =$$

$$\begin{aligned} & -zQ_{11} \left( \cos^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sin^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \sin 2\theta \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) - \\ & zQ_{12} \left( \sin^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \cos^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \sin 2\theta \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\sigma_2 =$$

$$\begin{aligned} & -zQ_{12} \left( \cos^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sin^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \sin 2\theta \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) - \\ & zQ_{22} \left( \sin^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \cos^2 \theta \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \sin 2\theta \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\tau_{12} = zQ_{66} \left[ \sin 2\theta \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \sin 2\theta \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2\cos 2\theta \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] \quad (20)$$

## 4 黏弹性复合材料结构阻尼-初始强度优化设计

### 4.1 多目标优化遗传算法

对于多目标优化问题, 采用如下数学模型:

$$\begin{cases} V_{\min} & f(x)=[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \\ \text{s.t.} & x \in X \\ & X \subseteq R^m \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $V_{\min}$  表示各个优化目标极小化, 即目标函数  $f(x)=[f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_n(x)]^T$  中的各个子目标函数都尽可能地达到最小值。

多目标优化问题的最优解与单目标优化问题的最优解有着本质的不同, 下面介绍 Pareto 最优解的定义。

1) 设  $X \subseteq R^m$  是多目标优化模型的约束集,  $f(x) \in R^n$  是多目标优化的向量目标函数, 有  $x_1 \in X, x_2 \in X$ . 若  $f_k(x_1) \leq f_k(x_2) (\forall k=1, 2, \dots, n)$ , 并且  $f_k(x_1) < f_k(x_2) (\exists k=1, 2, \dots, n)$ , 则称解  $x_1$  比解  $x_2$  优越。

2) 设  $X \subseteq R^m$  是多目标优化模型的约束集,  $f(x) \in R^n$  是多目标优化的向量目标函数, 若有解  $x_1 \in X$ , 并且不存在比  $x_1$  更优越的解  $x$ , 则称  $x_1$  是多目标优化模型的 Pareto 最优解。

由上述定义可知, Pareto 最优解只是多目标优化问题中一个可以接受的折衷解, 多目标优化一般有多个这样的 Pareto 最优解。所有 Pareto 最优解组成的集合称为多目标优化问题的 Pareto 最优解集。

对于确定多目标优化的 Pareto 最优解集问题, 常用的基于遗传算法的处理方法有权重系数变换法、并列选择法、共享函数法等, 其中权重系数变换法应用较为普遍, 本文即采用这种方法。

权重系数变换法通过给各个子目标函数  $f_i(x) (i=1, 2, \dots, n)$  赋予不同的权重  $w_i$ , 把各个子目标统一为一个子目标加权和函数, 再对加权和函数进行优化, 其中  $w_i$  为相应子目标在多目标优化问题中的重要程度。

加权和函数表示为:

$$Sum = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i(x) \quad (22)$$

权重系数变换法把多目标优化问题转化为单目标优化问题, 这样就可以利用单目标优化的遗传算法求解多目标优化问题。权重系数变换法可以通过改变各子目标的权重系数求得多目标优化问题的 Pareto 最优解集。

### 4.2 适应度函数的构造

遗传算法在搜索过程中仅以适应度函数值来衡量各个体适应度, 并以此为依据指导算法的搜索方向, 因此适应度函数的构造非常重要。本文的优化目标黏弹性复合材料结构应变能损耗因子和初始破坏的横向均布荷载值一般相差 7 个数量级左右, 二者差距非常大。优化过程中较小的优化目标非常容易丢失, 影响双目标优化的实现。针对这种情况, 作者构造了如下适应度函数:

$$Fit(f_i(x)) = \frac{2f_i(x)}{f_i^{\min}(x) + f_i^{\max}(x)} \quad (23)$$

式中:  $f_i(x)$  表示第  $i$  个优化目标的实际值;  $f_i^{\min}(x)$  表示第  $i$  个优化目标在定义域内的最小值;  $f_i^{\max}(x)$  表示第  $i$  个优化目标在定义域内的最大值。 $f_i^{\min}(x)$ 、 $f_i^{\max}(x)$  可以通过单目标优化计算确定。

很明显, 在目标函数值均非负的情况下, 如此构造的适应度函数值的取值范围为(0, 2), 而与优化目标的实际值变化范围无关, 这样就能避免各个优化目标实际值相距过大引起的较小目标在优化过程中被忽略的情况, 即避免优化结果偏移。

### 4.3 黏弹性复合材料结构阻尼-初始强度优化设计

以三层黏弹性复合材料结构为例, 对其阻尼性能 and 初始破坏强度进行优化设计。为了便于使用小挠度变形理论, 将黏弹性复合材料结构的最大挠度与厚度之比控制在 8% 以内。

本例中黏弹性复合材料结构总厚度  $h=6\text{mm}$ , 边长  $a=0.3\text{m}$ ,  $b=0.2\text{m}$ , 黏弹性层厚度为变量  $e_0$ 。承受横向均布荷载  $P_0$ , 边界条件为四边固支。整体结构的复合材料面层和阻尼层的力学性能参数分别列于表 1 和表 2 中。

以黏弹性复合材料结构面板纤维铺设角度  $\theta$ 、黏弹性材料层厚度  $e_0$  与总厚度  $h$  之比  $\gamma_h = e_0 / h$  为优化设计变量, 对黏弹性复合材料结构应变能损耗

表 1 复合材料面层力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of composite layers

材料参数	大小	材料参数	大小
$E_1$	140GPa	$Y_c$	98.1MPa
$E_2$	10GPa	$S$	44.7MPa
$\mu_{12}$	0.3	$\eta_{11}$	0.40%
$G_{12}$	5GPa	$\eta_{22}$	1.50%
$G_{13}$	5GPa	$\eta_{12}$	0
$G_{23}$	5GPa	$\eta_{66}$	2.00%
$X_t$	1128MPa	$\eta_{13}$	2.00%
$X_c$	785MPa	$\eta_{23}$	2.00%
$Y_t$	27.5MPa		

表 2 黏弹性阻尼层力学性能参数

Table 2 Mechanical properties of viscoelasticity layers

材料参数	大小	材料参数	大小
$E$	3.2GPa	$Y_t$	85MPa
$\mu$	0.34	$Y_c$	110MPa
$X_t$	85MPa	$S$	64MPa
$X_c$	110MPa	$\eta_v$	30%

因子和横向荷载作用下的强度进行优化设计。双目标优化函数用权重系数变换法表示为：

$$Sum = w_1 \cdot \text{Fit}(\eta(\chi)) + w_2 \cdot \text{Fit}(P_u(\chi)) \quad (24)$$

其中， $w_1 + w_2 = 1$ 。

优化设计参数  $\chi = [\theta, \gamma_h]$ ，即优化设计变量为 2 个。约束条件为： $\theta \in [0, 90^\circ]$ ； $\gamma_h = e_0 / h \in [0.1, 0.9]$ ， $w_{\max} \leq 8\% \cdot h$ 。采用改进自适应遗传算法<sup>[14]</sup>，设计变量采用二进制编码，长度分别为 20 位和 10 位。这样种群中每个个体的编码长度为 30 位。种群规模为 40，交叉概率  $P_c \in [0.5, 0.9]$ ，变异概率  $P_m \in [0.005, 0.1]$ ，保优率为 10%，移民个数为 5。采用进化代数固定的终止策略，进化代数取 100 次，目标权重不妨设为  $w_1 = w_2 = 0.5$ 。对黏弹性复合材料结构的强度、阻尼分别进行单目标优化和双目标优化，优化结果列于表 3 中。

表 3 黏弹性复合材料结构单目标优化和双目标优化结果  
Table 3 The optimization results of the single objective and double objective

设计方案	$\theta(^{\circ})$	$\gamma_h$	损耗因子 $\eta$	最大均布荷载值 $P_u/\text{kPa}$
初始设计	0	0.200	0.0263	74
对强度单目标优化设计	90	0.100	0.0274	334
对损耗因子单目标优化设计	18.4	0.900	0.0947	27
对损耗因子和强度双目标优化设计	90	0.541	0.0686	312

由表 3 可以看出，在强度优化设计中，复合结构的损耗因子和最大横向均布荷载相对原始设计均有提高，特别是最大横向均布荷载值提高的幅度相当大，由 74kPa 提高到 334kPa；复合结构的强度得到了明显的提高。在对损耗因子的优化设计中，黏弹性层相对厚度增大到边界值 0.9，复合结构应变能损耗因子明显增大，达到 0.0947；但最大均布荷载减小到 27kPa，此时强度大为减弱。在对损耗因子和强度的双目标优化设计中，损耗因子由单纯强度优化中的 0.0274 增加到 0.0686，提高较明显；且最大均布荷载由单纯损耗因子优化设计中的 27kPa 增加到 312kPa，只略低于强度优化设计中的 334kPa。可以认为(90°, 0.541)是可以接受的一组

Pareto 最优解。

## 5 结论

本文在经典层合板弯曲理论基础上，运用 Ritz 法建立了黏弹性复合材料结构应变能损耗因子和横向均布荷载作用下初始破坏强度计算模型。提出了新的适应度函数构造方法，以克服多目标优化中优化结果偏移现象，对黏弹性复合材料结构进行了单目标和双目标优化设计。优化结果表明：

(1) 遗传算法适用于黏弹性复合材料结构阻尼和强度性能的单目标和多目标优化设计。

(2) 本文提出的遗传算法适应度函数构造方法可以很好地克服多目标优化问题的优化结果偏移现象。

(3) 多目标优化设计能同时兼顾黏弹性复合材料结构的阻尼和强度性能，有利于发挥黏弹性复合材料结构良好的力学性能，促进黏弹性复合材料的工程应用。

## 参考文献：

- [1] Baker M. Analysis methods to support design for damping [J]. *Engineering with Computers*, 2007, 23(1): 1-10.
- [2] Chung H P, Woo L. Improved genetic algorithm for multidisciplinary optimization of composite laminates [J]. *Computers and Structures*, 2008, 86(19): 1894-1903.
- [3] 鲁大伟, 李书. 应用免疫遗传算法优化设计层合板铺层顺序[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(2): 247-250.  
Lu Dawei, Li Shu. Stacking sequence optimization of composite laminate applying genetic algorithm of immunity [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(2): 247-250. (in Chinese)
- [4] 张少辉, 陈花玲, 梁天锡. 纤维增强树脂基复合材料阻尼特性的数值模拟[J]. *航空材料学报*, 2004, 24(3): 10-14.  
Zhang Shaohui, Chen Hualing, Liang Tianxi. Numerical simulation on the damping characteristic of fiber reinforced composite [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2004, 24(3): 10-14. (in Chinese)
- [5] Berthelot J. Damping analysis of laminated beams and plates using the Ritz method [J]. *Composite Structures*, 2006, 74(2): 186-201.
- [6] Berthelot J, Mustapha A. Damping analysis of composite materials and structures [J]. *Composite Structures*, 2008, 85(3): 189-204.
- [7] Kristensen R F, Nielsen K L, Mikkelsen L P. Numerical studies of shear damped composite beams using a constrained damping layer [J]. *Composite Structures*, 2008, 83(3): 304-311.

(参考文献[8]-[14]转第 37 页)