

# 基于蚁群算法的复合材料缠绕壳体铺层顺序优化

栾宇<sup>1</sup>, 丁文辉<sup>2</sup>, 林天军<sup>1</sup>, 王路仙<sup>2</sup>, 关振群<sup>\*1</sup>

(1. 大连理工大学 运载工程与力学学部 工程力学系, 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024;  
2. 中国航天科技集团公司 第四研究院四十一所, 西安 710025)

**摘要:**为了提高纤维复合材料缠绕壳体结构的屈曲稳定性, 本文将蚁群算法(ACA)求解旅行商问题(TSP)的方法引入到缠绕层顺序优化的计算中。阐明铺层顺序优化的本质是调整沿板厚方向的刚度分布以提高版的抗弯刚度, 同时改善荷载的传递路径, 以降低由偏心而产生的附加弯矩, 从而提高结构的抗屈曲能力; 扩展了经典蚁群算法, 提出一种分组编解码方法, 既可描述缠绕工艺对铺层排列组合的约束, 又可降低城市数目以提高优化效率; 通过与经典算例的比较, 验证了本文方法的有效性和优越性; 并研发了复合材料缠绕壳体铺层顺序优化程序系统, 实现了壳体结构的屈曲稳定性优化设计。

**关键词:**蚁群算法; 纤维复合材料缠绕壳体; 屈曲稳定性; 优化设计

**中图分类号:** O359<sup>+</sup>.1      **文献标志码:** A

## 1 引言

以缠绕工艺加工制成的纤维复合材料壳体结构, 如高压气瓶和燃料发动机外壳等, 以其质量轻、强度高和尺寸稳定等优点, 在航空航天领域得到了广泛的应用。但是, 目前高性能纤维复合材料价格依然比较昂贵, 加之航空航天领域对零部件的安全性和可靠性要求较高, 这就促进了以提高结构性能和材料利用效率为目的的复合材料优化方法的研究与发展。

复合材料具有力学性能的可设计性, 在给定材料组分、结构形式、缠绕角度及缠绕层数量的条件下, 仍然可以通过调整铺设顺序对结构的力学性能进行优化。以铺层顺序作为变量的优化问题属于离散变量的组合优化问题, Raphael Haftka 等在 1992 年开始尝试使用整数规划算法对复合材料层合板的铺层顺序进行优化以提高平板的屈曲稳定性<sup>[1]</sup>, 后又将基因算法引入到优化过程中<sup>[2]</sup>。随着计算机算法的发展和研究工作的深入, 相关学者又尝试将遗传算法、神经网络算法和蚁群算法引入到复合材料层合板的铺层顺序优化计算中。唐文艳、顾元宪、赵国忠采用改进的遗传算法对复合材料层合板的铺层顺序进行了优化设计, 并对解码进行了

处理, 以满足平衡铺层要求<sup>[3]</sup>。修英姝和崔德刚提出采用神经网络模型确定规定角度下的铺层数, 再使用遗传算法对铺层顺序进行优化<sup>[4]</sup>。李太鹏和徐元铭提出基于 PATRAN/NASTRAN 的复合材料结构铺层的分级优化设计方法<sup>[5]</sup>。穆朋刚等提出基于蚁群算法的复合材料层合板的铺层顺序优化方法<sup>[6,10]</sup>, 并证明该方法对于确定层合板最佳铺层顺序的离散变量优化问题是行之有效的。

本文首先阐述了复合材料壳体铺层顺序与其抗屈曲能力之间的关系。文献[9]中的实验结果表明, 选用合适的参数, 蚁群算法在求解城市数为 5~100 的 TSP 问题时结果好于遗传算法、进化算法和模拟退火算法。这里针对所解决问题的规模和特点, 采用蚁群算法求解旅行商问题(TSP)的方法对复合材料的缠绕顺序进行优化。考虑到平面缠绕工艺对铺层排列组合的约束, 本文提出了一种自动分组编解码方法。通过对经典算例的求解, 验证了算法和程序的合理性和有效性; 并研发了复合材料缠绕壳体铺层顺序优化程序系统, 对一纤维缠绕壳体的铺层顺序进行优化, 提高其屈曲极限载荷。

## 2 问题的描述

本文讨论的缠绕壳体由平面缠绕工艺<sup>[7]</sup>加工而成, 图 1 为一种比较典型的结构——燃料发动机。从结构设计角度, 可将壳体分为直筒段(图 1

收稿日期: 2009-07-23; 修改稿收到日期: 2010-02-28.

作者简介: 栾宇(1981-), 男, 博士生;

关振群\*(1965-), 男, 教授, 博士生导师

(E-mail: guanzhq@dlut.edu.cn).

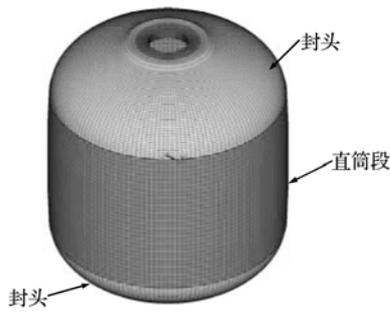


图 1 缠绕壳体有限元模型图

Fig. 1 FE model of wound composite case

紫色部分)与封头(图 1 绿色部分)。由于缠绕工艺的限制,壳体两端的封头结构中只含有纵向纤维;直筒段则为横向与纵向混合缠绕。由于此类结构用途多为压力容器,工程上一般按照网络理论<sup>[7]</sup>对直筒段进行等强度设计。网络理论是基于内压作用下强度计算,可以通过其确定纵向与横向纤维的缠绕层数与厚度,即壳体的面内刚度,但并无法确定缠绕顺序。

### 2.1 屈曲极限载荷与铺层顺序

一般而言,对于纤维复合材料层合板壳结构,其荷载与应变的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^0 \\ \boldsymbol{\kappa} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{N}$  为中面面内载荷向量,  $\mathbf{M}$  为弯矩向量,  $\boldsymbol{\varepsilon}^0$  为中面面内应变,  $\boldsymbol{\kappa}$  为中面曲率

$$\mathbf{A} = [A_{ij}], \mathbf{B} = [B_{ij}], \mathbf{D} = [D_{ij}]$$

而刚度阵中的  $A, B, D$  分别为

$$\begin{cases} A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{cases} \quad (2)$$

式中指标  $k$  为铺层编号,  $(\bar{Q}_{ij})_k$  为第  $k$  层的单层刚度  $Q_{ij}$  旋转至层合板主轴方向的值,  $z_k$  则表示第  $k$  层顶面距中性层的距离。由式(2)不难发现,拉伸刚度  $A_{ij}$  与铺层顺序无关;而弯曲刚度  $D_{ij}$  和耦合刚度  $B_{ij}$ ,除了与铺层厚度、铺层数有关外,还与铺层顺序有关。

对于复合材料层和结构,其轴向屈曲极限载荷主要决定于抗弯刚度  $D$  和耦合刚度  $B$ <sup>[8]</sup>,即屈曲荷载在铺层数确定的条件下主要取决于铺层顺序。还

需特别指出的是,这里讨论的复合材料壳体结构的屈曲极限荷载计算更为复杂,因为可能含有金属连接件和环向加强层(外层),如燃料发动机壳体;或含有金属内衬(内层),如高压气瓶。这类复合材料结构的一个主要特点是沿板厚方向刚度分布不均匀而造成偏心,在轴压作用下产生附加弯矩。铺层顺序优化,其实质就是通过调整刚度沿板厚方向的分布,在提高板抗弯刚度同时,改善轴向荷载的传递路径,降低由偏心而产生的附加弯矩,从而提高结构的抗屈曲能力。

### 2.2 数学模型的建立

对于缠绕顺序的优化问题属于离散变量优化问题,可作如下数学描述:

$$\begin{aligned} \max. \quad & \lambda_{CR}(X) \\ \text{s. t.} \quad & X \in (A | a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\lambda_{CR}$  为结构的屈曲荷载系数,向量  $X$  为缠绕层  $a_1 \sim a_n$  排列组成的向量。

对于离散变量优化问题,还需要使用相应的数值模型对问题进行等效代换,以便对问题进行求解。旅行商问题 STP(Salesman Traveling Problems)是指:给定  $n$  个城市和每两座城市之间的距离,求一条经过所有城市仅一次的最短路径。

对缠绕顺序的优化问题,各缠绕角度的排列次序相当于 TSP 中访问城市的先后顺序,目标函数值则相当于的 TSP 问题中的路径长度。根据工艺特点,对不同缠绕角度的缠绕层进行分组和编码,形成 TSP 问题中的城市编号,这样,就可将缠绕顺序优化问题转化为求解旅行商问题。

## 3 自动分组编解码方法

直筒段缠绕顺序形为:  $[\pm 70^\circ_2, 0^\circ_2, \pm 70^\circ_2]$ , 其中  $0^\circ$  表示环向缠绕角,  $\pm 70^\circ$  表示纵向缠绕角,每一度数代表一层。平面缠绕工艺以一个“ $\pm 70^\circ$ ”组合为一个缠绕循环,即一个缠绕循环含有两缠绕层,且二者角度互为正负,这就要求计算过程中必须保持“正负”缠绕角相连,将每一组  $\pm 70^\circ$  和每一个  $0^\circ$  分别作为 TSP 问题中的独立“城市”。为了建立符合工艺要求的 TSP 模型,本文提出了自动分组编解码技术。

### 3.1 编码

将一组铺设角度按照程序和工艺需要转化为

一组编码。例如含有 11 层的铺层顺序的优化问题，每种角度对应的层数和厚度已知，优化过程即确定缠绕顺序，例如初始设计顺序为

$[70^\circ, -70^\circ, 0^\circ, 70^\circ, -70^\circ, 70^\circ, -70^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$

编码规则为先用占位标识“-1”添加到每个  $0^\circ$  缠绕角后进行扩充，再顺序将每两个相邻元素编入到一个分组内，这种做法保证了将每组相邻的  $\pm 70^\circ$  缠绕层构划分为独立的编组，每个  $0^\circ$  缠绕层编入到一个独立编组内。扩充后分组结果为

$[(70^\circ, -70^\circ), (0^\circ, -1), (70^\circ, -70^\circ), (70^\circ, -70^\circ), (0^\circ, -1), (0^\circ, -1), (0^\circ, -1), (0^\circ, -1)]$

将上面的每个括号作为一个独立的分组，顺序进行编码，便得到 STP 问题中的城市号：1 ~ 8。

这样，就把含有 11 个缠绕层的顺序优化问题转化为了含有 8 个独立城市的 TSP 问题。

### 3.2 解 码

解码即将 TSP 问题还原为铺层顺序。在每一个优化循环之后，程序都要把编码转化为铺层顺序再传递给评估函数进行计算，经过一个循环的计算，得到该循环的较优编码，再按照编码规则和编号，对城市编码进行释放，就得到了铺层顺序。编码解码流程见图 2。

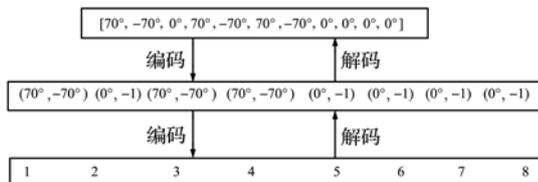


图 2 编码解码过程  
Fig. 2 Process of coding and decoding

## 4 优化过程及算例验证

蚁群算法(Ant Colony Algorithm)，是一种求解组合最优化问题的通用启发式方法。其原理来源于蚂蚁觅食的过程：蚂蚁在其经过的路径上留下一挥发性分泌物——信息素；同时蚂蚁又能感知周围环境中信息素的存在并以较高的概率选择信息素浓度高的路径，并继续分泌信息素加大路径上信息素的浓度，吸引更多的蚂蚁，形成正反馈，并最终找到最短路径<sup>[9]</sup>。

### 4.1 算法的实现

本文采用 C++ 语言编写蚁群算法程序，使用

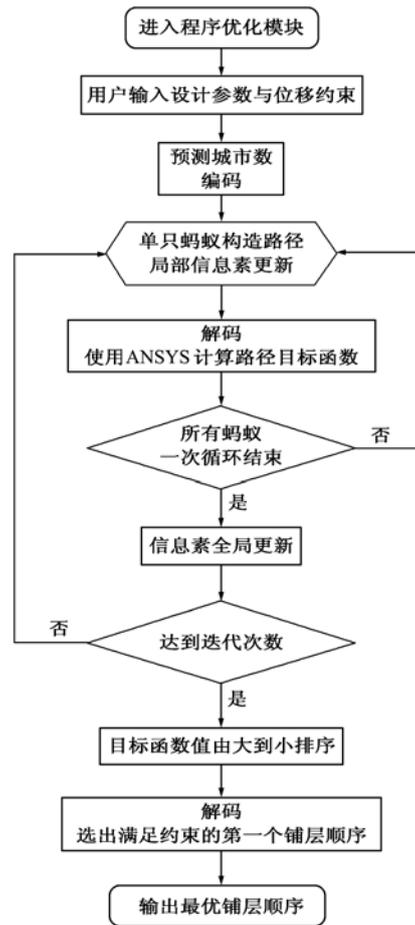


图 3 优化流程图  
Fig. 3 Flow chart of optimization

有限元软件 ANSYS 进行目标函数的计算。图 3 给出了整个优化过程的流程图。程序主要含有如下变量：城市个数  $N$ ，蚂蚁个数  $M$ ， $Ant$  为蚂蚁类，主要成员有  $ALLOWED[i][j]$  禁忌表，记录蚂蚁已经走过的城市； $AntColonySystem$  为蚁群系统类， $TAU[i][j]$  为任意两座城市  $i, j$  间的信息素浓度，用以计算蚂蚁选择某一路径的概率。

#### (1) 程序初始化

对用户的初始设计进行编码，获得各参数数值：城市个数  $N$ 、位移约束条件  $\delta_{USER}$ 、信息素挥发系数  $\alpha$  等。对每两座城市间路径上的信息素进行初始化： $\tau_{ij}(0) = \tau_0$  ( $\tau_0$  为常数)，这里  $\tau_0 = (n\lambda_{CR}) - 1$ ， $\lambda_{CR}$  是初始铺层顺序的目标函数值。每次循环开始前，初始化蚁群系统的蚂蚁，将  $M$  只蚂蚁随机的放置于任一城市，准备完成各自的搜索过程。

#### (2) 蚁群系统状态转移规则

位于节点  $r$  的蚂蚁通过式(4)，选择下一个移动到的城市  $s$ ：

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in allowed} \{ [\tau_u(t)]^{q_1} \}, q \leq q_0 \\ S, q > q_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $q$  是在  $[0, 1]$  区间均匀分布的随机数,  $q_0$  是蚁群系统的一个参数 ( $0 \leq q_0 \leq 1$ ),  $S$  为根据方程(5)给出的概率分布所选出的一个随机变量。

$$P_{ij}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^{q_1}}{\sum_{u \in allowed} [\tau_u(t)]^{q_1}} \quad (5)$$

(3) 蚁群系统局部更新规则

蚂蚁根据式(6)的局部更新规则对它们所经过的边进行局部更新。

$$\begin{aligned} \tau_{ij}(t) &\leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau(t) \\ \Delta\tau(t) &= \tau_0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, 参数  $0 < \rho < 1$ 。局部更新规则可以有效避免蚂蚁收敛到同一路径, 利于全局搜索。

(4) 蚁群系统全局更新规则

只有走过全局最优路径的蚂蚁才被允许释放信息素。全局更新在所有蚂蚁都完成它们的路径之后执行, 应用式(7)对所建立的路径进行更新。

$$\begin{aligned} \tau_{ij}(t) &\leftarrow (1 - \alpha) \cdot \tau_{ij}(t) + \alpha \cdot \Delta\tau(t) \\ \Delta\tau(t) &= \begin{cases} (\lambda_{gb})^{-1} & \text{如果 } (i, j) \in \text{全局最优路径} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $\alpha$  为信息素挥发参数,  $0 < \alpha < 1$ ;  $\lambda_{gb}$  为当前找到的全局最优路径。

(5) 找到满足位移约束的最佳铺层顺序

上述就是缠绕壳体铺层顺序优化的一个循环, 迭代到指定次数, 即可终止循环; 再按照目标函数值由大到小排序, 将最优函数值对应的缠绕顺序作为最佳缠绕顺序输出。

4.2 铺层优化时间与效率分析

在旅行商问题中,  $n$  个城市的可能路径数为  $n!$  个, 随着城市个数的增加, 解题规模会急剧增大。本文采用的分组编码策略, 在满足实际工艺要求的同时, 能有效减少城市数目, 降低问题规模, 提高整个算法效率。若不进行分组编码, 亦即每一铺层直接作为一单独城市, 这一方面将增加问题规模; 另一方面, 不分组求得的排序并不能保证满足工艺要求, 还另需对排序结果进行筛选, 这也会降低程序效率。此外, 在迭代过程中, 目标函数的计算, 即屈曲荷载的求解, 占据了整个优化过程的大部分时间。在最初的几次迭代中, 重复路径较少, 计算的时间较长; 随后的迭代过程中, 重复的铺层顺序会逐渐增多。为避免重复计算, 本文对蚁群算法求得的每种铺层顺序进行存储和判断操作, 解码后重复的铺层顺序不再进行计算, 以保证计算效率。以下计算实例将对此进行讨论。

4.3 算法验证

为了验证算法的合理性和有效性, 首先引用文献[1, 3, 6]中的算例: 16 层对称铺设四边简支层合板的屈曲荷载铺层优化问题。层合板长  $a = 0.508$  m, 宽  $b = 0.254$  m; 每层厚度  $t = 0.000127$  m。承受  $x$  方向均布轴压  $N_x = 175$  N/m 和  $y$  方向均布轴压  $N_y = KN_x$ 。单层板材料常数: 弹性模量  $E_1 = 128$  GPa,  $E_2 = 13$  GPa, 剪切模量  $G_{12} = 6.4$  GPa, 泊松比  $\nu = 0.3$ , 密度  $\rho = 1.6 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。本文的数值计算均采用有限元分析软件 ANSYS, 采用 20 节点层合板实体单元 Solid191, 以参数的形式定义单层版的材料常数、厚度和铺设角度; 选取 1/4 平面对称模型, 对截面使用对称约束处理, 共剖分单元 338 个。

表 1 铺层优化结果比较

Tab. 1 Comparison of optimal stacking sequence and buckling factor

荷载比 K	文献	优化结果	屈曲荷载系数	本文优化结果	屈曲荷载系数
0.125	[3]	$(-45^\circ, 45^\circ_2, -45^\circ, 45^\circ, -45^\circ_2, 45^\circ)_s$	154.182	$(-45^\circ_3, 45^\circ_4, -45^\circ)_s$	168.288
	[6]	$(45^\circ, -45^\circ_2, 45^\circ, -45^\circ, 45^\circ_2, -45^\circ)_s$	154.182		
0.15	[3]	$(-45^\circ, 45^\circ_2, -45^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 0^\circ)_s$	148.391	$(-45^\circ_2, 90^\circ, 45^\circ_2, 45^\circ, 90^\circ, 45^\circ)_s$	155.303
	[6]	$(-45^\circ, 45^\circ_2, -45^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 90^\circ)_s$	145.537		
0.20	[3]	$(-45^\circ, 45^\circ_2, 90^\circ, -45^\circ_2, 45^\circ, 90^\circ)_s$	135.698	$(-45^\circ_2, 90^\circ, 45^\circ_2, -45^\circ, 90^\circ, 45^\circ)_s$	150.161
	[6]	$(-45^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ_2)_s$	140.893		
0.24	[3]	$(45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 45^\circ)_s$	128.460	$(-45^\circ_2, 90^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 45^\circ_2, -45^\circ)_s$	141.268
	[6]	$(45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 45^\circ, 90^\circ)_s$	127.386		

蚁群算法中参数的取值分别为  $\alpha = 0.8, \rho = 0.6, q_0 = 0.7, \alpha_1 = 0.5, \beta = 2$ , 计算共迭代 100 次。表 1 说明了本文优化方法的有效性, 迭代次数不超过 30 次即可收敛至最优解。

### 5 壳体缠绕层顺序优化

对于纤维缠绕壳体轴压屈曲极限荷载的计算, 计算工况简图见图 5, 结构在上侧受到轴向压力作用, 下侧固支。与验证算例相同, 这里使用 ANSYS 计算特征值屈曲极限荷载, 计算使用 20 节点四面体层合板单元 SOLID191, 整个计算过程由 APDL 语言编写, 实现全参数化驱动。程序后台调用 ANSYS 进行评估函数的计算, 再根据结果对铺层顺序参数进行调整。

#### 5.1 直径 480 mm 纤维缠绕壳体优化

首先对一直径为 480 mm, 筒段长为 315 mm 的纤维缠绕燃料发动机壳体进行优化设计, 以提高其轴向稳定性。计算使用单层板模量为  $E_1 = 83 \text{ GPa}, E_2 = 4.8 \text{ GPa}, G_{12} = 1.8 \text{ GPa}, \nu = 0.45$ , 缠绕层厚度为 0.34 mm; 除金属连接件外, 该结构全

部由复合材料组成, 不含金属内衬。为了提高屈曲计算效率, 并考虑到结构本身结构特点, 计算使用 1/32 周期对称模型, 计算取第一阶屈曲极限荷载系数作为铺层顺序优化计的目标评估函数值。

迭代 15 次, 共进行 15 次特征值屈曲分析, 壳体屈曲荷载系数提高了 15.59%, 优化结果见表 2, 优化过程如图 6 所示。

上例全部采用了  $\pm 73^\circ$  的设计方案, 如果适当选取  $\pm 73^\circ$  与  $\mp 73^\circ$  相结合的排列顺序, 会得到更优的设计效果。如下例, 初始设计的屈曲荷载为  $1.454 \times 10^6 \text{ N}$ , 迭代 15 次, 共进行 30 次特征值屈曲分析, 优化结果为:  $1.702 \times 10^6 \text{ N}$  (见图 7), 稳定性系数提高了 17.06%。

从上面的优化过程图曲线看出, 仅经过不到 5 次的迭代, 即得到了最佳铺层顺序, 证明了本方法的有效性和良好的优化性能。

由 4.2 的分析, 编码策略提高了算法的效率。对于 480 mm 壳体, 给定同样的初始铺层顺序 ( $0^\circ, \pm 73^\circ_2, \mp 73^\circ_2, 0^\circ$ ), 同样都进行 8 次迭代后, 经过编码处理的总评估函数计算次数为 25 次, 得到的最优结果为  $1.702 \times 10^6 \text{ N}$ ; 未编码的总评估函数

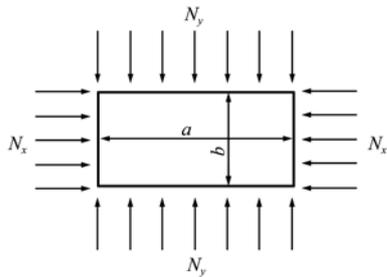


图 4 工况简图  
Fig. 4 Geometry and loading

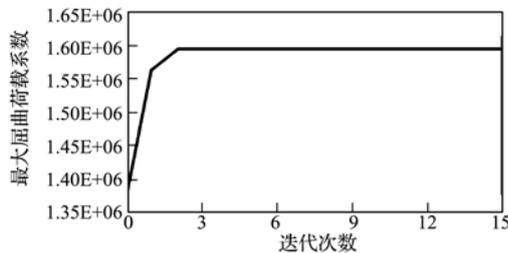


图 6 优化过程  
Fig. 6 Optimization process

表 2 初始铺层与优化结果

Tab. 2 Original and optimized stacking sequence

	铺层顺序	极限屈曲荷载(N)
初始输入	$(0^\circ, \pm 73^\circ_4, 0^\circ)$	$1.379 \times 10^6$
优化结果	$(\pm 73^\circ_2, 0^\circ_2, \pm 73^\circ_2)$	$1.594 \times 10^6$

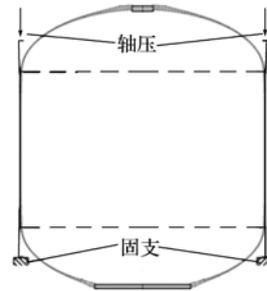


图 5 计算工况  
Fig. 5 Geometry and loading

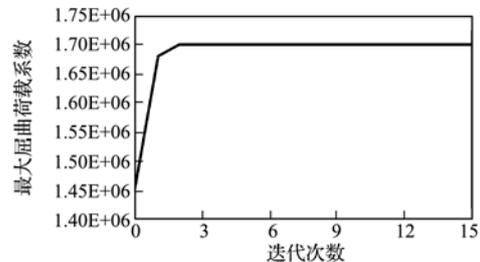


图 7 优化过程  
Fig. 7 Optimization process

表 3 初始铺层与优化结果

Tab. 3 Original and optimized stacking sequence

	铺层顺序	极限屈曲荷载(N)
初始输入	$(0^\circ, \pm 73^\circ_2, \mp 73^\circ_2, 0^\circ)$	$1.454 \times 10^6$
优化结果	$(\mp 73^\circ, \pm 73^\circ, 0^\circ_2, \pm 73^\circ, \mp 73^\circ)$	$1.702 \times 10^6$

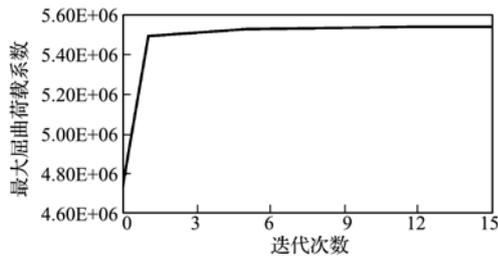


图8 优化过程

Fig. 8 Optimization process

计算次数为75次,得到的最优合法结果为 $1.688 \times 10^6$  N。由此验证了本文所引入编码策略的高效性。

### 5.2 直径1200 mm纤维缠绕壳体优化

这里对一直径为1200 mm,筒段长为1000 mm的纤维复合材料缠绕燃料发动机壳体进行了优化设计,以提高其轴压屈曲稳定性。计算流程及材料参数与直径480 mm壳体相同。

迭代次数为15次,评估函数总计算次数为168,结构的屈曲荷载提高了17.09%。初始与优化后铺层顺序及结果见表4,优化过程如图8所示。

表4 初始铺层与优化结果

Tab. 4 Original and optimized stacking sequence

铺层顺序	极限屈曲荷载(N)
初始输入 ( $0^\circ_4, \pm 73^\circ_2, 0^\circ, \pm 73^\circ_3, 0^\circ, \pm 73^\circ$ )	$4.728 \times 10^6$
优化结果 ( $\pm 73^\circ_2, 0^\circ, \pm 73^\circ, 0^\circ_5, \pm 73^\circ_3$ )	$5.536 \times 10^6$

## 6 结论

本文研究建立了基于蚁群算法的复合材料缠绕壳体铺层顺序优化方法。阐明了通过优化复合材料铺层顺序提高壳体结构抗屈曲能力的力学机理;针对蚁群算法和平面缠绕工艺特点,提出一种自动分组编解码方法,既可描述工艺对铺层排列组合的约束,又可降低城市数目以提高优化效率;建立全参数化的复合材料壳体模型,研制了面向工程的复合材料缠绕壳体铺层顺序优化程序。工程算例表明,本文提出的优化方法是有效的,较大幅度地提高了壳体结构的抗屈曲能力,并具有较高的计算效率。

## 参考文献(References):

[1] Haftka R T, Walsh J L. Stacking-sequence optimization for buckling of laminated plates by integer programming[J]. AIAA, 1992, **30**(3): 814-819.

- [2] Riche R L, Haftka R T, Optimization of laminate stacking sequence for buckling load Maximization by genetic algorithm[J]. AIAA Journal, 1993, **31**(5): 951-956.
- [3] 唐文艳,顾元宪,赵国忠. 复合材料层合板铺层顺序优化遗传算法[J]. 大连理工大学学报, 2004, **44**(2): 186-189. (TANG Wen-yan, GU Yuan-xian, ZHAO Guo-zhong. Stacking-sequence optimization of composite laminate plates by genetic algorithm[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, **44**(2): 186-189. (in Chinese))
- [4] 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 Ying-shu, CUI De-gang. Ply optimization design for stability of composite laminates[J]. Engineering Mechanics, 2005, **22**(6): 212-216. (in Chinese))
- [5] 李太鹏,徐元铭. 基于PATRAN/NASTRAN的复合材料结构铺层的分级优化设计方法[J]. 固体火箭技术, 2004, **4**(27): 308-315. (LI Tai-peng, XU Yuan-ming. A Multilevel optimization for layer design of composite structures based on PATRAN/NASTRAN [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, **4**(27): 308-315. (in Chinese))
- [6] 穆朋刚,赵美英,陈鹏飞,等. 基于蚁群算法的复合材料层合板的铺层顺序优化[J]. 玻璃钢/复合材料, 2007, **6**: 14-17. (MU Peng-gang, ZHAO Mei-ying, CHEN Peng-fei, et al. Ply stacking-sequence optimization of composite laminate plates by ant colony system[J]. 2007, **6**: 14-17. (in Chinese))
- [7] 王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. (WANG Yao-xian. The Structural Design of Composite Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001. (in Chinese))
- [8] 陈烈民,杨玉宁. 复合材料的力学分析[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006. (CHEN Lie-min, YANG Yu-ning. Mechanical Analysis for Composite Materials [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2006. (in Chinese))
- [9] 李士勇,等. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004. (LI Shi-yong, et al. Ant Colony Algorithms with Applications [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese))

- [10] 穆鹏刚,赵美英,刘关心,等. 蚁群算法在复合材料层合板优化设计中的应用[J]. 机械强度,2009,31(3): 410-413. (MU Peng-gang, ZHAO Mei-ying, LIU Guan-xin, et al. Ant colony algorithm for composite laminate plates design and optimization[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2009, 31(3): 410-413. (in Chinese))

## Stacking sequence optimization of filament wound composite case based on ant colony algorithm

LUAN Yu<sup>1</sup>, DING Wen-hui<sup>2</sup>, LIN Tian-jun<sup>1</sup>, WANG Lu-xian<sup>2</sup>, GUAN Zhen-qun<sup>\*1</sup>

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. The 41<sup>st</sup> Institute of the Fourth Academy of CASC, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to improve the buckling stability, this paper employs the methodology of solving salesman traveling problems by ant colony algorithm to optimize the stacking-sequence of the filament wound case. First, this paper explains the essence of stacking sequence optimization is adjusting the stiffness distribution along the thickness direction to improve the bending stiffness and the load path, through which the stability of the composite structure can be enhanced. Then, an automatic grouping and coding technique is proposed, which adapts the classic ant colony algorithm to the process technics constraint and improves the computational efficiency by reducing the number of cities. The validity and the superiority of the method are verified via a classic example. Finally, the program developed has been successfully used to improve the buckling stability of a composite case.

**Key words:** ant colony algorithm; filament wounded case; stability, optimization