

光学薄膜折展机构单元胞豆荚蜂窝杆优化

杨慧, 范硕硕, 刘荣强

引用本文:

杨慧, 范硕硕, 刘荣强. 光学薄膜折展机构单元胞豆荚蜂窝杆优化[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2244–2251.

YANG Hui, FAN Shuo-shuo, LIU Rong-qiang. Optimization of single lenticular honeycomb boom for optical film deployable mechanism[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2244–2251.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2244>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星载轻型柔性碳纤维伸杆设计

Design of light flexible carbon fiber boom for satellite

光学精密工程. 2017, 25(12z): 59–66 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172514.0059>

大口径薄膜相机伸展机构设计与精度测量

Design of deployable mechanism and accuracy measurement for heavy-caliber film camera

光学精密工程. 2017, 25(12z): 103–110 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172514.0103>

可展开固体反射面机构设计及运动学分析

Mechanism design and kinematic analysis of deployable solid reflector mechanism

光学精密工程. 2018, 26(12): 2940–2948 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182612.2940>

二级杠杆式微牛级微力发生机构

Design and functional analysis of a micro-Newton force generator

光学精密工程. 2018, 26(10): 2527–2535 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182610.2527>

离轴多反射镜系统支撑结构的设计与装调

Design and alignment of support structure for off-axis multi-mirror system

光学精密工程. 2015, 23(8): 2280–2287 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152308.2280>

文章编号 1004-924X(2020)10-2244-08

光学薄膜折展机构单元胞豆荚蜂窝杆优化

杨 慧^{1*}, 范硕硕¹, 刘荣强²

(1. 安徽大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601;

2. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:超弹性杆折展机构越来越多地用于太空卫星光学薄膜的收拢和展开的支撑问题, 为了避免使用过程中因应力集中而产生疲劳裂纹, 延长超弹性杆使用寿命, 对复合材料超弹性杆在不同铺层方式下压扁后的应力进行了研究。首先, 建立单元胞豆荚蜂窝杆有限元模型, 使用显示动力法对其压扁后的状态进行非线性数值分析。然后, 通过复合材料单元胞豆荚蜂窝杆的不同铺层方式下的压扁后最大应力值建立径向基函数代理模型。最后, 利用 ISIGHT 软件中的遗传算法进行铺层角度的优化。仿真结果表明, 在铺设层数为两层的情况下, 两层应力对应有有限元结果与径向基函数(RBF)结果之间的误差都小于 9.95%。复合材料单元胞豆荚蜂窝杆采用两层铺层时, 最优的铺层角为第一层、第二层分别为 81.962° 和 82.671°。

关键词:可折展机构; 单元胞豆荚蜂窝杆; 径向基函数; 优化

中图分类号: TH128 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202810.2244

Optimization of single lenticular honeycomb boom for optical film deployable mechanism

YANG Hui^{1*}, FAN Shuo-shuo¹, LIU Rong-qiang²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: huiyang@163.com

Abstract: Hyper-elastic boom-deployable mechanisms are increasingly used to support and collapse the optical film of space satellites. To avoid fatigue crack caused by stress concentration during operation and to prolong service life, the stress in the hyper-elastic boom after flattening under different layup operations was studied. First, a finite-element model of a single lenticular honeycomb (SLH) boom was established, and a non-linear numerical analysis after flattening was performed using the explicit dynamic method. Thereafter, an approximate model of the radial basis function (RBF) was established using the maximum stress after flattening under different lamination modes of the SLH boom. Finally, the Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm in ISIGHT software was used to optimize the layup angle. Simulation results show that the error values of the stresses between the finite-element and RBF results are less than 9.95%. According to the results obtained, the SLH boom is laminated

收稿日期: 2020-02-25; 修订日期: 2020-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51975001); 国家自然科学基金重点项目 (No. 51805002)

with two layers, with the optimal layering method constituting the first and second layers, 81.962° and 82.671° , respectively.

Key words: deployable mechanism; single lenticular honeycomb boom; radial basis function; optimization

1 引 言

为了满足不同航天任务的需要,空间可折展机构得到广泛的使用。为了使光学薄膜在工作中发挥最大作用,对光学薄膜展开机构的要求十分严格^[1-3]。可展机构在运载发射过程中,具有大折叠比、轻量化和高稳定性等特点,在进入空间轨道后,通过地面控制实现展开并锁定。光学薄膜支撑机构锁定后的刚度直接影响望远镜观测的分辨率,因此,其可折展机构是核心技术之一^[4-6]。

2011年,Murphey^[7]提出了一种人形弹性杆结构,它由两个横截面具有一定曲率的薄壁壳体粘贴在一起组成的,压扁后可实现人形杆的卷曲缠绕。Bai^[8]等对热真空环境下的可展开复合臂进行分析,结果表明,辐照和遮挡零件上的显著温差可导致复合臂明显的弯曲变形。Stabile^[9]等对一种薄壁可展开臂的压扁和缠绕进行了详细分析,确保该结构能在不发生故障的情况下折叠。蔡祈耀^[10]等分析了拉扁和压扁过程应力、应变和载荷-位移的变化规律,进行了薄壁管拉扁和压扁过程试验,对比分析试验测试结果与计算分析结果,验证模拟分析方法,证明拉扁和压扁为大位移小应变的过程。李瑞雄^[11]等对复合材料缠绕肋不同材料参数(铺设角度、层数、厚度)和不同几何参数(卷轴直径、肋圆弧直径、扁平率)下整体缠绕过程进行了数值模拟分析。王安稳^[12]等基于Reddy分层理论推导出纤维增强黏弹性复合材料层合板的动力学方程,研究了纤维体积分量和纤维增强层厚度对自然频率和损耗因子的影响。房光强^[13]等对豆荚杆进行优化设计,并对多种豆荚杆试件进行性能测试与评估,选取其中综合性能优异的材料体系研制了2 m长豆荚杆样机。利用研制的豆荚杆收展控制机构对豆荚杆的收拢-展开性能进行了测试,结果显示玻璃布/FEB豆荚杆可实现多次收拢-展开,其综合性能基本满足空间可展开结构的性能需求。

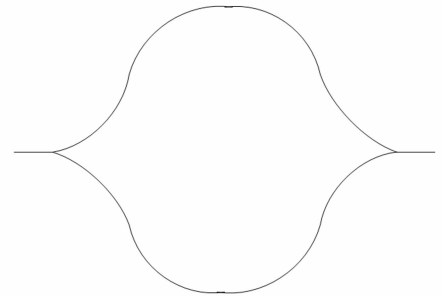
Bordogna^[14]等基于连续梯度的层压参数优化,提出了离散的堆叠序列优化策略。Agraw-

al^[15]等为确定两层不同织物(玻璃和碳纤维)的最佳堆叠顺序(位置和方向)对混合复合材料的机械性能,摩擦和磨损响应进行了研究。Amir^[16]等研究了网格增强屈曲载荷对堆叠顺序的影响。Gong^[17]等研究了低速冲击和冲击后负荷下堆叠顺序对非卷曲碳纤维复合材料层压板的影响,并揭示凹痕深度,损坏长度和宽度以及损坏容限方面的损坏特征之间的关系。

本文提出了一种单元胞豆荚蜂窝杆,利用ABAQUS软件建立单元胞豆荚蜂窝杆形杆仿真模型,对复合材料单元胞豆荚蜂窝杆在两层铺层方式下不同铺层角度的压扁过程进行应力分析,得到了最佳铺层方式。

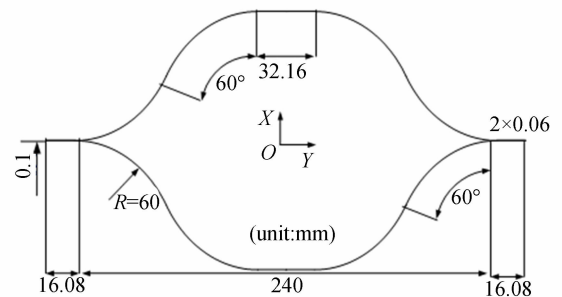
2 三棱锥弹性杆展开机构

传统豆荚杆如图1(a)所示。单元胞豆荚蜂窝杆如图1(b)所示,在中间部分两圆弧段连接处多出一段平滑段,相比于传统豆荚杆,它很容易构成多元胞豆荚蜂窝杆,如1(c)所示。



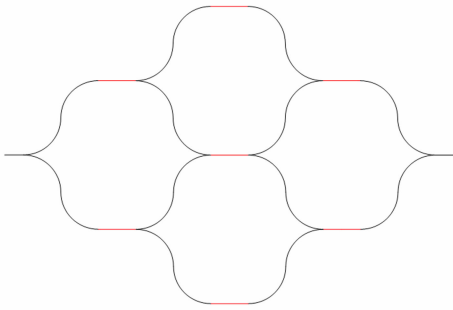
(a) 豆荚杆截面

(a) Cross-sectional view of double lenticular boom



(b) 单元胞豆荚蜂窝杆截面

(b) Cross-sectional view of single lenticular honeycomb boom



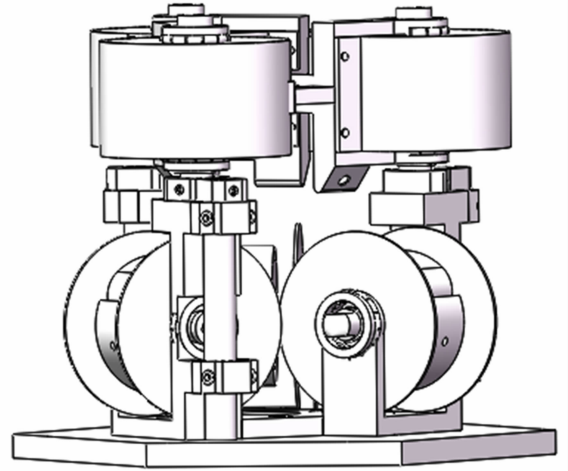
(c) 四元胞豆荚蜂窝杆截面

(c) Cross-sectional view of four-cell lenticular honeycomb boom

图 1 三种复合材料弹性杆

Fig. 1 Three kinds of composite deployable elastic boom

本文提出一种三棱锥支撑结构,能满足光学薄膜展开后的刚度要求。它由顶端滚轴连接机构、单元胞豆荚蜂窝杆、根部滚轴连接机构和收拢锁定机构组成。图 2(a)所示为该机构展开状态模型,该机构分为顶部支撑光学薄膜部分和底部连接部分。顶部支撑光学薄膜部分为正三角形结构,由 3 个顶端滚轴连接机构、3 个单元胞豆荚蜂窝杆、3 个弹簧和光学薄膜组成,顶端滚轴连接机构与单元胞豆荚蜂窝杆通过螺栓固定,光学薄膜由弹簧连接在顶端滚轴连接机构上。底部连接部分包括根部滚轴连接机构和收拢锁定机构,根部滚轴连接机构与顶端滚轴连接机构通过单元胞豆荚蜂窝杆连接,由螺栓固定。火箭发射时,单元胞豆荚蜂窝杆收拢在顶端滚轴连接机构和根部滚轴连接机构里,收拢状态如图 2(b)所示。到达太空



(b) 单元胞豆荚蜂窝杆三棱锥可折展机构收拢状态
(b) Folded state of single lenticular honeycomb boom triangular pyramid deployable mechanism

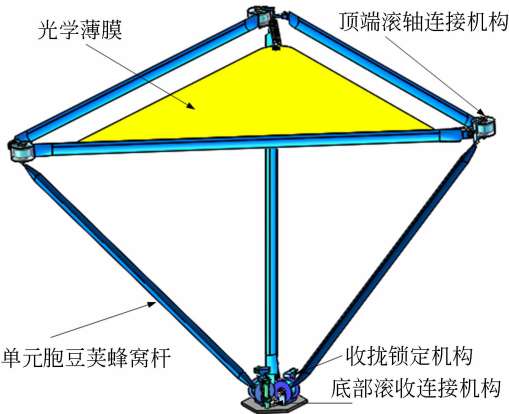
图 2 单元胞豆荚蜂窝杆三棱锥折展机构

Fig. 2 Triangular pyramid deployable mechanism for single lenticular honeycomb boom

后,锁定机构打开,顶端滚轴连接机构在单元胞豆荚蜂窝杆弹簧的驱动作用下实现同步释放展开,到位后自动锁定刚化直至整个支撑机构完全展开锁定,此时光学薄膜完全展开。

3 几何模型和材料参数

单元胞豆荚蜂窝杆的几何图如图 3 所示,截面如图 1(b)所示。圆弧半径 $R=60$,每段圆弧对应圆心角为 60° ,黏结段长度为 16.08 mm ,黏结胶厚度为 0.1 mm ,中间水平段长度为 32.16 mm ,



(a) 单元胞豆荚蜂窝杆三棱锥可折展机构展开状态
(a) Unfolded state of single lenticular honeycomb boom triangular pyramid deployable mechanism

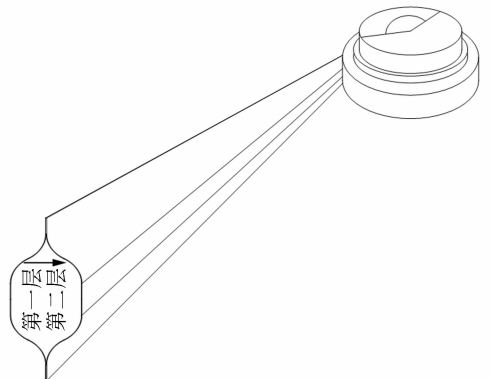


图 3 单元胞豆荚蜂窝杆几何示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single lenticular honeycomb boom

整个杆关于 XOZ 面对称。每层铺设厚度为 0.06 mm,选择二层铺设,铺设材料选择 T300,材料参数如表 1。

表 1 T300 材料属性

Tab.1 Material properties of T300

参 数	值
E_1 /GPa	14
E_2 /GPa	9.4
E_3 /GPa	9.4
G_1 /GPa	4.6
G_2 /GPa	4.6
G_3 /GPa	3
λ	0.3
ρ /(kg · m ⁻³)	1 600

注: $E_1 \sim E_3$ 为弹性模量, $G_1 \sim G_3$ 为剪切模量。

4 有限元分析

通过 ABAQUS 建立三维有限元模型如图 4 所示。以单元胞豆荚蜂窝杆几何中心为坐标原点,截面关于 YOZ 平面对称,上、下压板采用平板压块,定义为解析刚体,压块为主面与单元胞豆荚蜂窝杆之间建立接触,Cohesive 部件与单元胞豆荚蜂窝杆黏结段采用绑定连接,黏结段整体完全固定;对两个黏接板施加固定旋转约束,上压板向下移动 60 mm,上压板向上移动 60 mm,设置 20 次可以完全压扁,每次上压板向下压 3 mm,下压板向上压 3 mm。单元胞豆荚蜂窝杆的上侧上表面、下侧下表面分别与上、下压板建立表面接触,

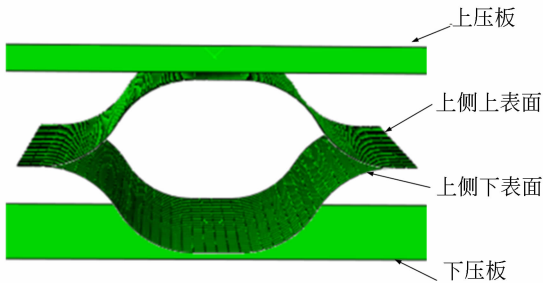


图 4 单元胞豆荚蜂窝杆有限元模型

Fig. 4 Finite element model of single lenticular honeycomb boom

弯曲部分上、下内表面建立接触,避免单元胞豆荚蜂窝杆产生穿透;单元胞豆荚蜂窝杆采用壳单元 S4R 模拟,黏结胶采用表面单元 C3D8R 模拟,为了实现压扁,单元胞豆荚蜂窝杆弯曲段布置了较密的种子,而两边的黏结段部分单元格划分为较为稀疏,整个单元胞豆荚蜂窝杆分为 2 200 个单元。以一、二层铺层角分别为 30°和 75°为例进行压扁分析,材料铺层图如图 5 所示。

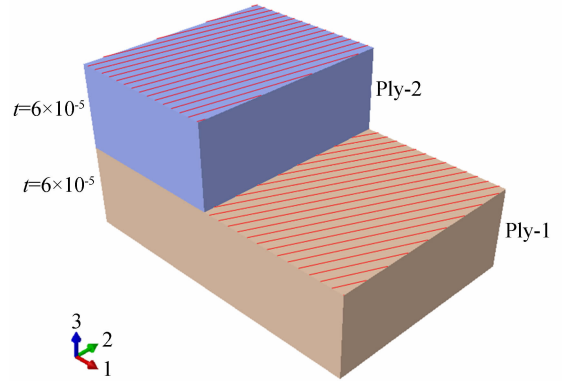


图 5 30°和 75°铺层角示意图

Fig. 5 Diagram for ply angles of 30° and 75°

由于单元胞豆荚蜂窝杆关于 XOZ 面呈对称分布,上下两片带翼片的应力结果相同,取其中一片分析即可,选取路径如图 6 所示。

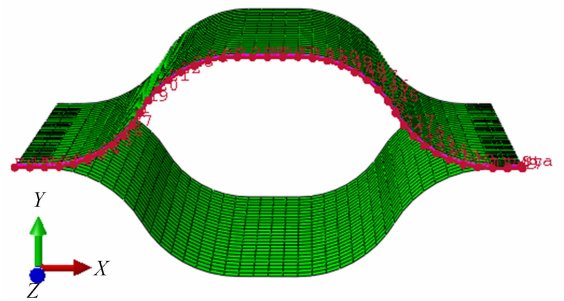


图 6 路径选取

Fig. 6 Path selection

仿真时单元胞豆荚蜂窝杆上下压板同时挤压,上压板往下压,下压板往上压,压 20 次可完全压扁。完全压扁时,第一层与第二层的最大应力分别达到了 68.85 MPa 和 14.50 MPa,最大应力出现在圆弧段与黏结段连接处,圆弧拐点处应力较小,中间平滑段应力近似为零。

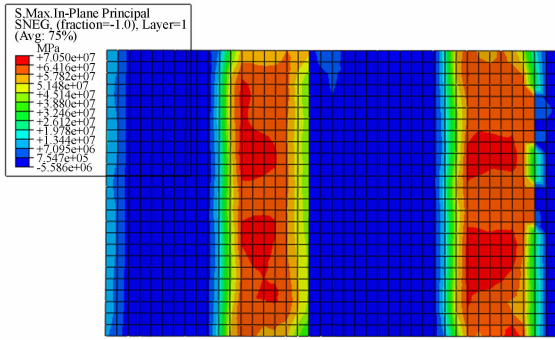


图 7 压扁后的应力云图

Fig. 7 Cloud chart of stress after flattening

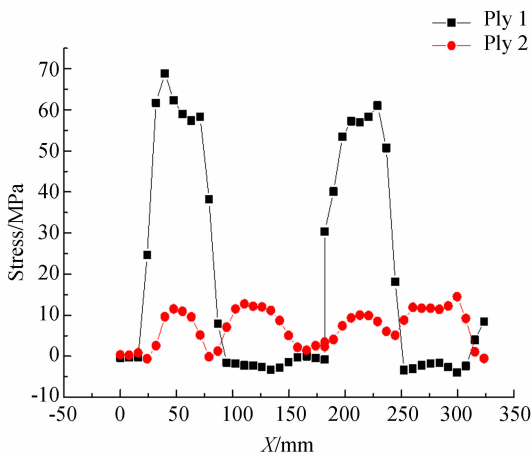


图 8 30°和 75°铺层横截面应力曲线

Fig. 8 Stress curves of ply cross section for ply angles of 30° and 75°

5 径向基函数代理模型

5.1 样本点以及有限元结果

本研究选择二层铺设方式,铺层角度选为 0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°,层数较少,可选用全因子试验设计方法,共需要实验样本 49 个,取样结果如表 2 所示。另取 7 个样本点评估模型精度。

5.2 建立近似模型

径向基函数建立数学模型就是利用离散数据点拟合近似函数 $f(x)$ ($x \in R^n$) 来无限逼近 n 维变量实值函数 $F(x)$ 。径向基核函数 $\varphi(r)$ 作为 $f(x)$ 的基函数,待测样本点与中心点的欧氏距离作为自变量,通过这些函数的线性叠加来计算未知待测 x 处的响应结果。径向基函数本质上是一个实数值函数,其取值仅仅取决于离中心点 c

的距离,即 $\varphi(x,c) = \varphi(\|x-c\|)$,当 c 为 0 时,取值变为到原点的距离,即 $\varphi(x) = \varphi(\|x\|)$ 。径向基函数近似模型方法的显著特点是通过欧氏距离的引入,可以很容易地把一个多维空间预测问题转化成为仅含有欧式距离自变量的一维问题,大大减少计算量和数据处理时间。

径向基函数近似模型一般可表达如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \beta_i \varphi(\|x-x_i\|), \quad (1)$$

其中: $f(x)$ 为整个压扁后每层对应的最大应力, β 为欧式距离基函数 $\varphi(\cdot)$ 的加权系数, $\varphi(\cdot)$ 为基函数, $\|\cdot\|$ 为欧式范数, $r_{ij} = \|x_i - x_j\|$ ($i, j = 1, 2, \dots, m$) 是待测点 x 与样本点 x_i 之间的欧式距离。本研究采用的径向基核函数为逆二次函数 $\varphi(r) = (r^2 + c^2)^{-\frac{1}{2}}$,用式(1)作为预测模型时,它要满足的插值条件如下:

$$f(x) = F(x_j), j = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可以得到:

$$\mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\beta} = \mathbf{F}, \quad (3)$$

其中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \varphi(r_{11}) & \cdots & \varphi(r_{1m}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi(r_{m1}) & \cdots & \varphi(r_{mm}) \end{bmatrix}$, 向量 $\mathbf{F} =$

$\begin{bmatrix} F(x_1) \\ \vdots \\ F(x_m) \end{bmatrix}$ 。式(3)在样本点不重合且函数 $\varphi(r)$ 为

正定函数时存在唯一解,即:

$$\boldsymbol{\beta} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{F}. \quad (4)$$

求出 $\boldsymbol{\beta}$,即可得到近似模型。近似模型求出后,可以代入模型求出待测处的响应值。

5.3 模型误差分析

径向基函数模型得到所有样本点的值都是精确的,即在样本点处使用 RBFs 近似模型得出的预测值和实际值是相等的,这从求系数的推导中可以看出,如表 3 所示。为了判断 RBFs 近似模型的精度,需要获取建立近似模型样本点外的待测点。在径向基函数近似模型中,基函数和样本点的选取都可以给近似结果造成一定的误差,为了测定响应面和径向基函数近似解与有限元解的误差,定义了相对误差的表达式,即 $RE = \frac{\tilde{f}(x^{(i)}) - f(x^{(i)})}{f(x^{(i)})}$,其中, $f(x^{(i)})$ 是第 i 个样本点处的有限元分析值, $\tilde{f}(x^{(i)})$ 是第 i 个样本点处的

径向基函数近似解,其中 $i=1,2,\dots,N$, N 是样本点的个数。通过比较待测点的相对误差可以评价模型的拟合效果。这里选取 7 个待测样本点评估

代理模型精度,结果如表 3 所示。所选样本点,第一层、第二层最大应力误差均小于 10%,模型精度满足要求。

表 2 实验设计样本点及每层所受最大应力的有限元分析结果

Tab.2 Finite element analysis results of experimental design sample points and maximum stress on each ply

序号	铺层角/(°)		最大应力/MPa		序号	铺层角/(°)		最大应力/MPa		序号	铺层角/(°)		最大应力/MPa	
	α_1	α_2	σ_1	σ_2		α_1	α_2	σ_1	σ_2		α_1	α_2	σ_1	σ_2
1	0	0	147.98	147.44	18	30	45	83.25	63.23	35	60	90	21.01	10.86
2	0	15	123.84	121.78	19	30	60	71.90	30.49	36	75	0	15.45	86.56
3	0	30	103.12	82.44	20	30	75	68.85	14.50	37	75	15	15.43	82.65
4	0	45	92.67	48.87	21	30	90	64.99	12.72	38	75	30	13.78	69.31
5	0	60	87.90	25.08	22	45	0	48.69	93.99	39	75	45	12.26	44.71
6	0	75	84.80	15.21	23	45	15	52.84	97.49	40	75	60	11.60	21.12
7	0	90	84.79	14.37	24	45	30	60.80	82.04	41	75	75	10.98	11.19
8	15	0	120.75	124.21	25	45	45	63.69	61.67	42	75	90	11.08	10.46
9	15	15	143.69	145.10	26	45	60	49.79	30.06	43	90	0	14.50	84.81
10	15	30	120.76	101.24	27	45	75	43.93	12.77	44	90	15	13.80	84.32
11	15	45	97.21	57.86	28	45	90	41.80	11.88	45	90	30	12.90	63.80
12	15	60	85.45	28.57	29	60	0	24.60	89.87	46	90	45	11.97	40.91
13	15	75	82.54	15.49	30	60	15	27.62	90.32	47	90	60	11.35	21.11
14	15	90	78.78	13.92	31	60	30	28.66	74.14	48	90	75	10.85	11.08
15	30	0	81.03	103.63	32	60	45	29.94	52.08	49	90	90	11.19	10.56
16	30	15	97.07	120.65	33	60	60	26.86	26.48	—	—	—	—	—
17	30	30	105.19	105.05	34	60	75	19.68	11.11	—	—	—	—	—

表 3 测试误差样本点

Tab.3 Sample points of REs

序号	每层对应铺层角		第一层最大应力/MPa		第二层最大应力/MPa		RE/%	
	α_1 /(°)	α_2 /(°)	FE result	RBFs	FE result	RBFs		
1	10	10	147.30	137.42	148.24	138.34	6.71	6.68
2	20	40	99.75	101.84	72.58	74.70	-2.10	-2.92
3	35	50	68.27	72.98	50.76	51.58	-6.90	-1.62
4	40	55	60.77	61.89	41.11	40.56	-1.84	1.34
5	50	65	39.60	39.25	20.90	22.15	0.88	-5.98
6	55	70	29.77	29.08	14.59	15.79	2.32	-8.22
7	65	80	16.11	15.44	10.53	10.10	4.16	4.08

6 多目标优化设计

将单元胞豆荚蜂窝杆的铺层角度 α_1 和 α_2 作为变量,压扁后每层所受最大应力 σ_1 和 σ_2 作为目标量,两个目标同等重要,可以选择遗传算法 (Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm,

NSGA)来实现优化,种族大小选为 50,遗传代数选为 100,比例因子和权重都为 1。优化设计目标函数如下:

$$\begin{cases} Opt. \{ \sigma_1 |_{\min}; \sigma_2 |_{\min} \} \\ 0^\circ \leq \alpha_1 \leq 90^\circ \\ 0^\circ \leq \alpha_2 \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

可行的结果如表 4 所示。最优结果为序号 12, 建立有限元模型, 求出两层铺层角 81.962° 和 82.671° 对应的有限元分析结果, 如表 5 所示。两

层应力对应的有限元结果与径向基函数结果之间的误差都小于 9.95%, 再次验证了 RBF 代理模型的精确度, 也得到了最优的铺层角。

表 4 Pareto 可行的设计点

Tab. 4 Feasible design points of Pareto

序号	每层对应铺层角/ $^\circ$		最大应力/MPa		序号	每层对应铺层角/ $^\circ$		最大应力/MPa	
	α_1	α_2	σ_1	σ_2		α_1	α_2	σ_1	σ_2
1	81.967	82.581	9.748	9.566	9	81.959	82.710	9.751	9.562
2	81.968	82.581	9.748	9.566	10	81.959	82.655	9.750	9.564
3	81.968	82.592	9.748	9.565	11	81.968	82.658	9.750	9.563
4	81.970	82.593	9.748	9.565	12	81.968	82.662	9.750	9.563
5	81.959	82.609	9.749	9.565	13	81.959	82.667	9.750	9.563
6	81.959	82.620	9.749	9.564	14	81.959	82.671	9.750	9.563
7	81.959	82.624	9.749	9.564	15	81.962	82.671	9.750	9.563
8	81.959	82.625	9.749	9.564	—	—	—	—	—

表 5 最优设计点有限元结果及误差

Tab. 5 Finite element analysis result and error of optimal design points

序号	每层对应铺层角/ $^\circ$		第一层最大应力/MPa		第二层最大应力/MPa		RE/%
	α_1	α_2	FE result	RBFs	FE result	RBFs	
15	81.962	82.671	10.728	9.750	10.620	9.563	9.12 9.95

7 结 论

本文采用 ABAQUS 显示动力学分析法对复合材料单元胞豆荚蜂窝杆的压扁状态进行仿真, 并通过径向基函数建立了代理模型, 最后利用 ISIGHT 软件采用 NCGA 对两层铺层角进行

了优化。结果表明: 复合材料单元胞豆荚蜂窝杆采用两层铺层方式时, 最优的铺层方式为第一层、第二层铺层角分别为 81.962° 和 82.671° ; 复合材料单元胞豆荚蜂窝杆压扁后, 对应铺层角度为 90° 时, 单元胞豆荚蜂窝杆各处所受应力较小, 而对应铺层角度为 0° 时, 各处所受应力较大。

参考文献:

[1] 毛思达, 邹永刚, 范杰, 等. 离子后处理对 TiO_2 光学薄膜及损伤特性的影响[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1451-1457.
MAO S D, ZOU Y G, FAN J, et al.. Influence of plasma treatment on optical and damage properties of TiO_2 thin films[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(7): 1451-1457. (in Chinese)

[2] 姜玉刚, 刘华松, 陈丹, 等. 基于离子束溅射 Ta_2O_5 薄膜的紫外吸收膜技术[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 527-532.
JIANG Y G, LIU H S, CHEN D, et al.. Ultraviolet absorption film technology based on ion beam

sputtering Ta_2O_5 thin films [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 527-532. (in Chinese)

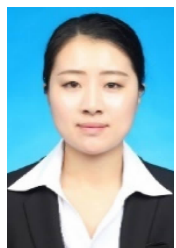
[3] 张立超, 高劲松. 长春光机所深紫外光学薄膜技术研究进展[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2395-2401.
ZHANG L CH, GAO J S. Developments of DUV coating technologies in CIOMP[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2395-2401. (in Chinese)

[4] DING X L, LI X. Design of a type of deployable/retractable mechanism using friction self-locking joint units[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 92: 273-288.

[5] 高明星. 空间大口径光学主镜展开机构设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
GAO M X. *The Design of Deployable Mechanisms*

- of Space Large Aperture Optical Primary Mirror [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [6] 王春龙. 空间大口径可折展薄膜相机机构设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG CH L. *Mechanism Design and Analysis of Space Large Aperture Deployable Membrane Optical Imager*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [7] MURPHEY T. Historical perspectives on the development of deployable reflectors[C]. *50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Palm Springs, California. Reston, Virginia: AIAA*, 2009.
- [8] BAI J B, SHENOI R A, XIONG J J. Thermal analysis of thin-walled deployable composite boom in simulated space environment[J]. *Composite Structures*, 2017, 173: 210-218.
- [9] STABILE A, LAURENZI S. Coiling dynamic analysis of thin-walled composite deployable boom[J]. *Composite Structures*, 2014, 113: 429-436.
- [10] 蔡新耀, 陈务军, 张大旭, 等. 薄壁管状空间伸展臂压扁拉扁数值模拟与试验分析[C]. 2014 年可展开空间结构学术会议摘要集, 中国力学学会, 会议论文集, 2014.
CAI Q Y, CHEN W J, ZHANG D X, *et al.*. Numerical simulation and experimental analysis of squashing and stretching of thin-walled tubular space extension arm [C]. *2014 Conference on Space Structure. The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014. (in Chinese)
- [11] HU Y, CHEN W J, LI R X, *et al.*. Mechanical characteristics of deployable composite thin-walled lenticular tubes[J]. *Composite Structures*, 2016, 153: 601-613.
- [12] 胡明勇, 王安稳. 纤维增强粘弹性复合材料层合板的自由振动和应力分析[J]. *工程力学*, 2010, 27(8): 10-14, 20.
HU M Y, WANG A W. Free vibration and stress analysis of fiber-reinforced viscoelastic composite laminated plates[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(8): 10-14, 20. (in Chinese)
- [13] 房光强, 彭福军. 航天器可展开支撑杆的研制及其收拢展开特性研究[J]. *材料工程*, 2009, 37(S2): 157-160.
FANG G Q, PENG F J. Fabrication and retraction/deployment testings of space deployable booms[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009, 37(S2): 157-160. (in Chinese)
- [14] BORDOGNA M T, MACQUART T, BETTEB-GHOR D, *et al.*. Aeroelastic optimization of variable stiffness composite wing with blending constraints[C]. *17th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Washington, D. C.. Reston, Virginia: AIAA*, 2016.
- [15] AGARWAL G, PATNAIK A, SHARMA R K, *et al.*. Effect of stacking sequence on physical, mechanical and tribological properties of glass-carbon hybrid composites[J]. *Friction*, 2014, 2(4): 354-364.
- [16] EHSANI A, REZAEPAZHAND J. Stacking sequence optimization of laminated composite grid plates for maximum buckling load using genetic algorithm[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 119: 97-106.
- [17] GONG K. *The Effect of Stacking Sequence on Impact Resistance and Damage Tolerance in Non-crimp Carbon Fabric Composites* [D]. Manchester: The University of Manchester, 2015.

导师简介:



杨 慧(1986—),女,安徽亳州人,副教授,硕士生导师,2011年、2015年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要研究方向为超弹/超柔空间可展开机构设计、折纸机器人及多目标优化设计。E-mail: huiyang_@163.com



刘荣强(1965—),男,江苏徐州人,教授,博士生导师,1989年、1995年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,目前从事的主要科研方向为宇航空间机构和星球探测软着陆缓冲吸能及应用。E-mail: liurq@hit.edu.cn