

圆柱壳三次非均匀有理B样条曲线变角度铺放轨迹设计及屈曲特性

曹忠亮 林国军 董明军 韩振华 曹清林

Variable angle placement trajectory design of non-uniform rational B-splines curve and buckling property of cylindrical shell

CAO Zhongliang, LIN Guojun, DONG Mingjun, HAN Zhenhua, CAO Qinglin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210622.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Bezier曲线变角度层合板设计及屈曲特性分析

Design of Bezier curve variable angle laminates and analysis on buckling property

复合材料学报. 2017, 34(8): 1729–1735 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161205.004>

纤维角度对变角度层合板减振性能的影响

Influences of fiber angle on the vibration damping performance of variable angle laminates

复合材料学报. 2021, 38(11): 3693–3703 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210301.001>

基于自动铺放技术的高精度变刚度复合材料层合板屈曲性能

Buckling performance of high-precision variable stiffness composites laminate based on automatic placement technology

复合材料学报. 2020, 37(11): 2807–2815 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200218.001>

复合载荷作用变刚度复合材料回转壳屈曲优化

Buckling optimization of variable stiffness composite rotary shell under combined loads

复合材料学报. 2019, 36(4): 1052–1061 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180626.004>

铺放工艺参数对预浸料丝束曲线铺贴质量的影响

Influence of laying process parameters on curve trajectory placement quality of prepreg tow

复合材料学报. 2021, 38(6): 1795–1808 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200826.004>

模态缺陷条件下复合材料柱形壳屈曲特性

Buckling property of a composite cylindrical shell considering mode imperfections

复合材料学报. 2017, 34(3): 588–596 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160523.015>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210622.003

圆柱壳三次非均匀有理 B 样条曲线变角度
铺放轨迹设计及屈曲特性



分享本文

曹忠亮^{*1,2}, 林国军², 董明军¹, 韩振华¹, 曹清林¹

(1. 江苏理工学院 机械工程学院, 常州 213000; 2. 齐齐哈尔大学 机电工程学院, 齐齐哈尔 161001)

摘 要: 基于三次非均匀有理 B 样条 (NURBS) 曲线, 开展纤维变角度圆柱壳设计及其屈曲特性研究。首先, 以三次 NURBS 曲线定义纤维变角度铺放参考轨迹, 确定了变角度铺层的表示方式。其次, 以纤维变角度铺层 $\pm<25(0.4)(0.8)75>$ 和 $\pm<65(0.4)(0.8)10>$ 为例, 展示了三次 NURBS 曲线轴向平移铺层和周向平移铺层在圆柱壳上的纤维角度分布情况。然后, 用纤维变角度铺层代替定刚度圆柱壳中的 $\pm 45^\circ$ 铺层, 对变刚度圆柱壳进行线性屈曲分析, 对轴向平移圆柱壳、周向平移圆柱壳和定刚度圆柱壳进行对比。最后, 在曲率半径约束下, 研究权因子对圆柱壳屈曲性能的影响。结果表明: 周向平移圆柱壳有着更好的屈曲性能; 在曲率半径约束下, 通过确定起始角、终止角和控制点参数得到屈曲性能优异的变刚度圆柱壳, 而改变权因子能使变刚度圆柱壳的屈曲载荷再次提高。

关键词: 三次非均匀有理 B 样条 (NURBS) 曲线; 圆柱壳; 变角度; 轨迹规划; 屈曲特性

中图分类号: TB330.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)06-3020-09

Variable angle placement trajectory design of non-uniform rational B-splines curve and buckling property of cylindrical shell

CAO Zhongliang^{*1,2}, LIN Guojun², DONG Mingjun¹, HAN Zhenhua¹, CAO Qinglin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213000, China;

2. School of Mechatronics Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161001, China)

Abstract: Based on cubic non-uniform rational B-splines (NURBS) curve, the design and bucking property of cylindrical shell produced by fiber variable angle placement were studied. Firstly, the reference trajectory of fiber variable angle placement was defined by cubic NURBS curve, and the parameterized expression of fiber variable angle placement was determine. Secondly, taking the fiber variable angle placements $\pm<25(0.4)(0.8)75>$ and $\pm<65(0.4)(0.8)10>$ as examples, the fiber angle distributions of the axial and circumferential shift placements of the cubic NURBS curve on the cylindrical shell were demonstrated. Then, the $\pm 45^\circ$ placement of constant stiffness cylindrical shell was replaced by the fiber variable angle placements. The linear buckling analysis of the variable stiffness cylindrical shell was carried out, and the axial translation cylindrical shell, circumferential translation cylindrical shell and constant stiffness cylindrical shell were compared. Finally, the influence of weight factors on the buckling property was studied under the constraint of curvature radius. The results show that the circumferential translation cylindrical shell has better buckling performance. Under the constraint of curvature radius, the variable stiffness cylindrical shell with excellent buckling performance can be obtained by determining initial angle, termination angle and control point parameter, and the buckling load of the variable stiffness cylindrical shell can be increased again by changing the weight factor.

Keywords: non-uniform rational B-splines (NURBS) curve; cylindrical shell; variable angle; trajectory planning; bucking property

收稿日期: 2021-05-19; 修回日期: 2021-06-15; 录用日期: 2021-06-16; 网络首发时间: 2021-06-22 15:52:57

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210622.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (51705266)

通信作者: 曹忠亮, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复合材料铺放成型工艺、变角度轨迹规划 E-mail: caoliang-8302@163.com

引用格式: 曹忠亮, 林国军, 董明军, 等. 圆柱壳三次非均匀有理 B 样条曲线变角度铺放轨迹设计及屈曲特性 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 3020-3028.
CAO Zhongliang, LIN Guojun, DONG Mingjun, et al. Variable angle placement trajectory design of non-uniform rational B-splines curve and buckling property of cylindrical shell[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(6): 3020-3028(in Chinese).

碳纤维增强树脂复合材料因其比强度高、比模量高、质量轻等优点,已被广泛应用在国民生产的各个领域,特别是航空航天等高尖端技术领域^[1-2]。薄壁圆柱壳结构是航空、航天、机械等工程领域常用的结构形式,圆柱壳结构的复合材料化成为结构轻量化和屈曲性能提升的有效途径。使用碳纤维增强树脂复合材料,能减少飞机自身的重量,降低燃油的消耗,进而提升飞机的综合性能^[3-4]。

传统的复合材料构件在制造过程中,都是定刚度(Constant stiffness, CS)复合材料构件,采用定角度轨迹铺放的成型方式,随着铺放技术的发展,纤维变角度铺放技术逐渐得到应用。纤维变角度铺层的刚度随着纤维角度的变化而改变,故可以在不改变层合板铺层数量的情况下,提高层合板的力学性能,改变应力集中问题^[5]。变刚度(Variable stiffness, VS)的概念最早由Gürdal等^[6-7]提出的,纤维铺放角度沿着参考几何轴线性变化形成纤维曲线路径。在此研究基础之上,很多研究学者都对变角度轨迹进行了数学建模与分析。Wu等^[8]用拉格朗日多项式对轨迹进行规划,Ravleigh-Ritz法进行了优化分析,提高了层合板的屈曲载荷。Alhajahmad等^[9-10]以Lobatto-Legendre多项式为参考路径设计VS层合板,以不同载荷和边界条件对VS层合板进行线性与非线性屈曲分析,发现将纤维置于各层优化后的最佳方向,可显著提高承载力和屈曲荷载。Marouene等^[11]使用了圆弧曲线设计VS层合板,用ABAQUS建立二维模型进行线性与非线性屈曲分析,与实验结果进行比较,验证了有限元模型有效性。Blom等^[12]利用线性变角度曲线对圆柱壳进行变刚度设计,对施加弯矩载荷的圆柱壳进行屈曲分析,使复合材料圆柱壳的屈曲性能提高了17%。Rouhi等^[13-14]研究了方向相反的弯曲组合载荷下VS圆柱的屈曲性能,分析半径和高宽比两个结构参数对VS圆柱结构改进的影响。最后发现,在厚度不变情况下,半径对VS圆柱屈曲载荷的影响不大,而纵横比对屈曲载荷的影响较大。Rouhi等^[15]还对VS圆柱进行设计、制造和试验,对比验证了有限元方法计算结果的准确性。实验结果表明,VS圆柱的屈曲能力比CS圆柱提高18.5%左右。Khani等^[16]开展了强度约束的VS圆柱壳弯曲屈曲优化设计,使屈曲性能提高

15%~30%,用有限元软件ABAQUS进行非线性屈曲分析,验证了变刚度设计比定刚度设计在屈曲能力上的改进,并对改进机理进行了探讨。

吴尘瑾等^[17]利用ANSYS软件对五种纤维角度非线性变化的VS层合板进行建模运算,在单轴和双轴载荷下,进行屈曲载荷计算分析并与CS层合板对比。结果表明,与CS层合板相比,屈曲载荷得以显著提高。闫光等^[18]利用ANSYS建立有限元模型,分析了开口尺寸和铺层角度对含矩形开口的复合材料圆柱壳屈曲载荷的影响,在开口处加装复合材料口盖对结构进行补强,补强后的柱壳结构满足强度设计要求。孙士平等^[19]研究了复合载荷作用下曲线纤维铺层形式对VS复合材料回转壳屈曲性能的影响规律。研究发现弯扭载荷作用下,VS圆柱壳的屈曲性能随弯矩载荷占比增加而提高,且均好于准各向同性圆柱壳,但扭矩载荷占优时,优化CS圆柱壳的屈曲性能更具有优势。吴双华等^[20]运用ABAQUS分别对外压荷载、内压荷载、外压轴压组合荷载和内压轴压组合荷载下的VS圆柱壳进行屈曲分析,发现铺设角度非线性变化比铺设角度线性变化的铺设方案,更有利于提高内压轴压组合荷载下圆柱壳的抗屈曲性能。邓同强^[21]用ANSYS中建立纤维角度线性变化的圆柱壳有限元模型;在轴压,弯矩,扭矩载荷条件下,同时分析圆柱壳几何尺寸对屈曲性能的影响。得出在弯矩载荷作用下,用曲线纤维铺层代替层合壳中含有45°直线铺层可显著提高圆柱壳的屈曲性能的结论。赵志远^[22]利用Abaqus对圆柱壳进行轴向载荷及外压载荷下的屈曲失效分析。探究分析了曲率半径及长径比变化对特定铺层角度组合及铺层厚度下的碳纤维/聚醚醚酮(CF/PEEK)圆柱壳力学性能的影响规律,得到了CF/PEEK圆柱壳构件屈曲稳定性最好时的相关参数。

非均匀有理B样条(NURBS)曲线能精确的统一表示解析曲线和自由曲线,在现阶段数控加工领域中应用非常广泛。NURBS曲线比起Bezier曲线和B样条曲线更灵活,有着更大的设计自由度。而在自动纤维铺放领域中,现有的NURBS曲线大都针对复杂几何形状的零件进行铺放轨迹设计,用来拟合已求出的轨迹离散点。纤维复合材料变角度纤维轨迹设计多种多样,并且现有对VS圆柱壳的研究大部分用的是线性变角度轨迹,还未有NURBS曲线在圆柱壳零件的直接应用。

本文针对圆柱壳零件采用三次 NURBS 曲线对其进行轨迹规划, 通过初始参考轨迹沿轴向平移和周向平移得到两种不同的 VS 圆柱壳铺层, 研究其纤维角度变化规律, 建立三次 NURBS 曲线的数学模型, 给出了 VS 圆柱壳的建模方法, 在轴压、扭矩载荷作用下, 以曲率半径作为约束条件, 用一阶屈曲模态作为评价标准, 对比分析轴向平移和周向平移圆柱壳的载荷分布情况, 研究控制点和权因子对曲线形状及圆柱壳屈曲性能的影响。

1 变刚度圆柱壳的定义

1.1 三次非均匀有理 B 样条 (NURBS) 曲线轨迹规划

三次 NURBS 曲线构建的纤维铺放参考轨迹如图 1 所示, NURBS 曲线从 P_0 点开始, 终止于 P_3 点, 在 P_0 和 P_3 点处的夹角分别是 α_0 和 α_1 , 取两端点切线上的动点 P_1 和 P_2 作为控制点, 控制点 P_1 和 P_2 之间在 y 轴方向上的差值为 h 。

由图 1 可以得出三次 NURBS 曲线的向量方程式:

$$\begin{cases} C(u) = \frac{\omega_0 N_{0,3} P_0 P_0 + \omega_1 N_{1,3} P_0 P_1 + \omega_2 N_{2,3} P_0 P_2 + \omega_3 N_{3,3} P_0 P_3}{\omega_0 N_{0,3} + \omega_1 N_{1,3} + \omega_2 N_{2,3} + \omega_3 N_{3,3}} \\ P_0 P_0 = (0, 0) \\ P_0 P_1 = (\beta_1 a, \beta_1 a \tan \alpha_0) \\ P_0 P_2 = (\beta_2 a, \beta_1 a \tan \alpha_0 + h) \\ P_0 P_3 = (a, \beta_1 a \tan \alpha_0 + h + (1 - \beta_2) a \tan \alpha_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: β_1 为控制点 P_1 的位置参数; β_2 为控制点 P_2 在 x 轴方向上的位置参数; h 为控制点 P_1 、 P_2 间在 x 轴方向上距离。在 β_1 和 β_2 确定情况下, h 能决定控制点 P_2 和 P_3 在 y 轴方向上的位置, N_{ij} 为三次 NURBS 曲线的基函数。

$$y(u) = a \frac{N_{1,3} \omega_1 \beta_1 \tan \alpha_0 + N_{2,3} \omega_3 \left(\beta_1 \tan \alpha_0 + \frac{h}{a} \right) + N_{3,3} \omega_3 \left[\beta_1 \tan \alpha_0 + \frac{h}{a} + (1 - \beta_2) \tan \alpha_1 \right]}{N_{0,3} \omega_0 + N_{1,3} \omega_1 + N_{2,3} \omega_2 + N_{3,3} \omega_3} \quad (3)$$

图 2 为 NURBS 曲线因权因子 ω 改变使其形状发生相应的变化 P 。

$$\frac{dy}{dx} = \frac{A(u) \beta_1 \tan \alpha_0 + B(u) \left(\beta_1 \tan \alpha_0 + \frac{h}{a} \right) + C(u) \left(\beta_1 \tan \alpha_0 + \frac{h}{a} + (1 - \beta_2) \tan \alpha_1 \right)}{A(u) \beta_1 + B(u) \beta_2 + C(u)} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{aligned} A(u) = & (N'_{1,3} N_{0,3} - N'_{0,3} N_{1,3}) \omega_0 \omega_1 + \\ & (N'_{1,3} N_{2,3} - N'_{2,3} N_{1,3}) \omega_1 \omega_2 + \\ & (N'_{1,3} N_{3,3} - N'_{3,3} N_{1,3}) \omega_1 \omega_3 \end{aligned} \quad (5)$$

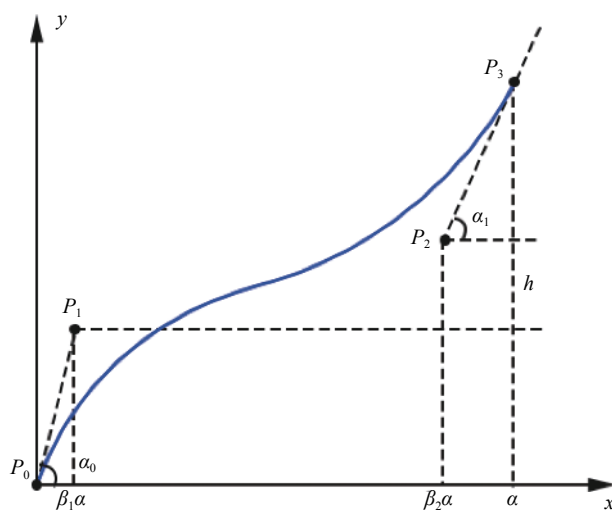


Fig. 1 Cubic non-uniform rational B-splines (NURBS) curve

图 1 三次非均匀有理 B 样条 (NURBS) 曲线

Fig. 1 Cubic non-uniform rational B-splines (NURBS) curve

由上述可得三次 NURBS 曲线在 xy 坐标系中的表达式:

$$x(u) = a \frac{N_{1,3} \omega_1 \beta_1 + N_{2,3} \omega_2 \beta_2 + N_{3,3} \omega_3}{N_{0,3} \omega_0 + N_{1,3} \omega_1 + N_{2,3} \omega_2 + N_{3,3} \omega_3} \quad (2)$$

三次 NURBS 曲线任意一点的斜率, 如下式所示:

$$\begin{aligned} B(u) = & (N'_{2,3} N_{0,3} - N'_{0,3} N_{2,3}) \omega_0 \omega_2 + \\ & (N'_{2,3} N_{1,3} - N'_{1,3} N_{2,3}) \omega_1 \omega_2 + \\ & (N'_{2,3} N_{3,3} - N'_{3,3} N_{2,3}) \omega_2 \omega_3 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} C(u) = & (N'_{3,3} N_{0,3} - N'_{0,3} N_{3,3}) \omega_0 \omega_3 + \\ & (N'_{3,3} N_{1,3} - N'_{1,3} N_{3,3}) \omega_1 \omega_3 + \\ & (N'_{3,3} N_{2,3} - N'_{2,3} N_{3,3}) \omega_2 \omega_3 \end{aligned} \quad (7)$$

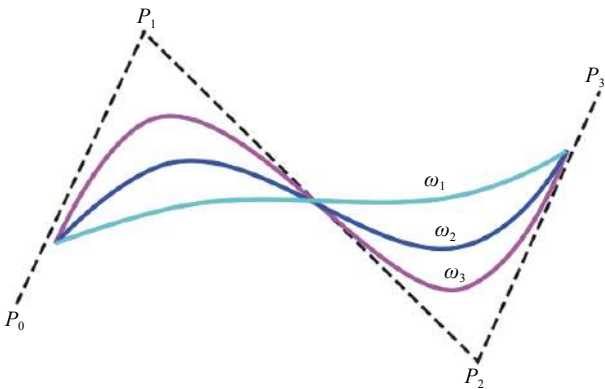


图 2 NURBS 曲线随权因子 ω 变化 ($\omega_1<\omega_2<\omega_3$)

Fig. 2 NURBS curve varies with weight factor ω ($\omega_1<\omega_2<\omega_3$)

三次 NURBS 曲线通过参数 β 和 h 来改变控制点的位置从而控制角度的非线性变化，再由权因子 ω 对曲线斜率角进行局部调整，使对应的曲线轨迹也发生变化。通过调整控制点和权因子，NURBS 曲线能用来表示 Bezier 曲线和 B 样条曲线，也能用来逼近线性变角度曲线和定曲率曲线。因此，NURBS 曲线变角度轨迹的设计空间大于其它曲线，在角度变化过程中的设计自由度更大。

圆柱壳展开面的长 L 与目标圆柱壳端面的周长 C 对应相等，圆柱壳展开面的宽与圆柱壳高度 H 对应相等，则圆柱壳的半径为 $r=L/2\pi$ 。如图 3 所示，设圆柱壳展开面的四个端点为 $a: (x_a, y_a)$ 、 $b: (x_b, y_b)$ 、 $c: (x_c, y_c)$ 、 $d: (x_d, y_d)$ ，在圆柱壳展开面中规划一条曲线做为初始参考轨迹曲线，其上下两端点分别为 $e: (x_e, y_e)$ 、 $f: (x_f, y_f)$ ，矩形图的长为 $L=x_b-x_a$ ，宽为 $H=y_d-y_a$ 。

将图 3 轨迹线应用到图 4 所示圆柱壳上。在

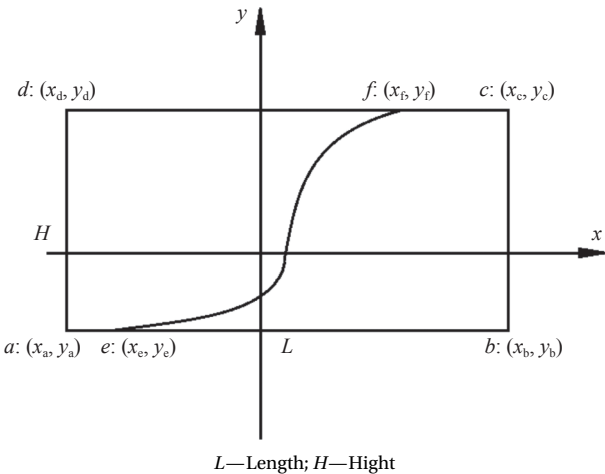
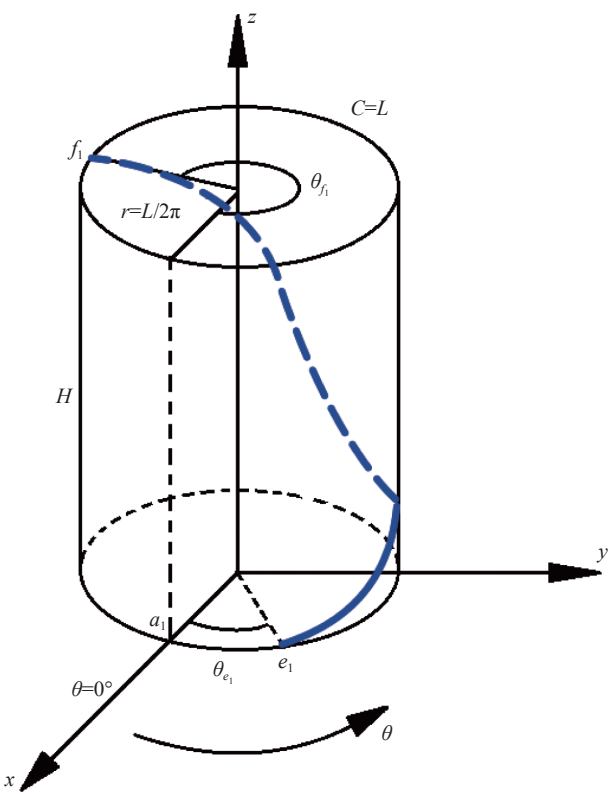


图 3 圆柱壳展开面

Fig. 3 Development surface of cylindrical shell



θ —Angle between the plane formed by the current calculation point and z -axis and the oxz plane; C —Circumference; r —Radius

图 4 圆柱壳三维示意图

Fig. 4 Three-dimensional diagram of cylindrical shell

圆柱壳底面的中心建立空间直角坐标系，使 z 轴与圆柱壳的中心轴重合。

设 θ 角为当前计算点和 z 轴所构成的平面与 oxz 平面的夹角， θ 角沿图 4 中的箭头所示方向为正，轨迹线由 e_1 点开始沿 θ 角的正方向铺放。其中 $L_{ae}=x_e-x_a=a_1\widehat{e_1}$ ，圆弧 $a_1\widehat{e_1}$ 所对应的角度为 $\theta_{e_1}=2\pi L_{ae}/C=(x_e-x_a)/r$ ，则可得到 $e_1: (r\cos\theta_{e_1}, r\sin\theta_{e_1}, y_e-y_a)$ 。同理，对整条轨迹进行坐标变换得到圆柱壳上的初始铺放轨迹。坐标变换公式即为

$$\begin{cases} x_{cyl} = r \cos [(x-x_a)/r] \\ y_{cyl} = r \sin [(x-x_a)/r] \\ z_{cyl} = y-y_a \end{cases} \tag{8}$$

1.2 变刚度圆柱壳铺层的表示方式

影响参考轨迹的参数有起始角 α_0 、终止角 α_1 、和控制点 β 和权因子 ω 。本文采用三次 NURBS 曲线参考轨迹，为保证初始轨迹线沿周向和轴向平移所得到的铺层都能铺满圆柱壳面，控制点 P_3 与控制点 P_0 应位于同一轴线上，且两控制点应在两端的圆周上。参考纤维角度线性变化的参考轨迹进行定义，最终采用下式对变刚度铺层进行

定义：

$$\pm <\alpha_0(\beta_1)(\beta_2)\alpha_1(\omega_1)(\omega_2)>$$
 (9)

当权因子都相等时，控制点对曲线的影响程度相等，三次 NURBS 曲线将不考虑权因子的作用，下述例子统一设定权因子 $\omega=1$ 。

圆柱壳初始轨迹分别沿圆柱壳圆周方向和轴线方向平移，将得到变刚度周向平移 (Variable stiffness circumferential translation, VSC) 铺层和变刚度轴向平移 (Variable stiffness axial translation, VSA) 铺层。图 5(a) 为 $\pm<25(0.4)(0.8)75>$ 轴向平移的圆柱壳铺层及其展开面示意图。图 5(b) 为 $\pm<25(0.4)(0.8)75>$ 周向平移的圆柱壳铺层及其展开面示意图。由图 5 可知，初始小角度终止大角度的轨迹，周向平移所得的铺层在圆柱壳中段轨迹线比较密集，轴向平移所得的铺层在圆柱壳开始铺放的一侧轨迹线比较密集。

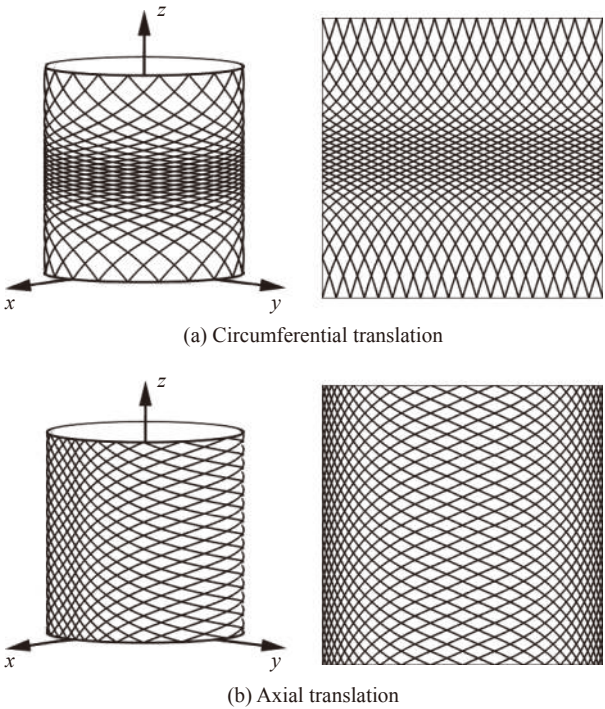


图 5 复合材料圆柱壳 $\pm<25(0.4)(0.8)75>$ 铺层示意图
Fig. 5 Diagram of composite cylindrical shell $\pm<25(0.4)(0.8)75>$ layer

图 6(a) 为 $\pm<65(0.4)(0.8)10>$ 周向平移的圆柱壳铺层及其展开面示意图。图 6(b) 为 $\pm<65(0.4)(0.8)10>$ 轴向平移的圆柱壳铺层及其展开面示意图。由图 6 可知，初始大角度终止小角度的轨迹，周向平移所得的铺层在圆柱壳两端轨迹线比较密集，轴向平移所得的铺层在圆柱壳终止铺放的一侧轨迹线比较密集。

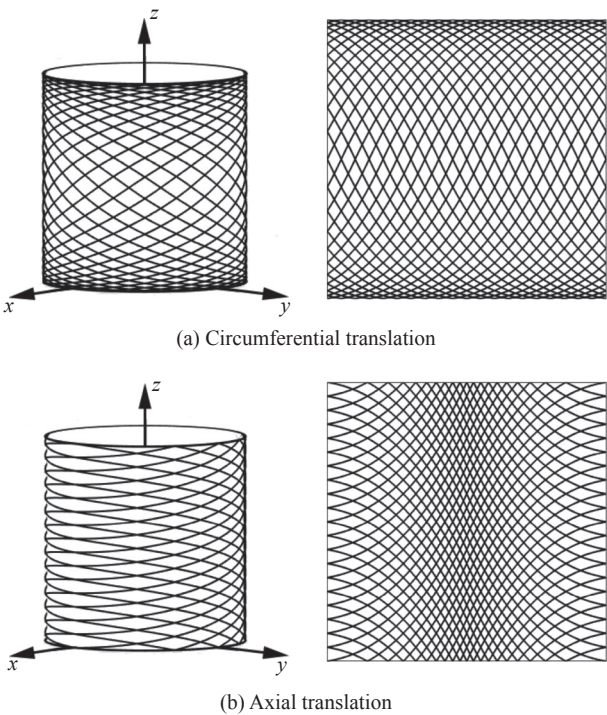


图 6 复合材料圆柱壳 $\pm<65(0.4)(0.8)10>$ 铺层示意图
Fig. 6 Diagram of composite cylindrical shell $\pm<65(0.4)(0.8)10>$ layer

对比图 5 和图 6 所示的铺层，对于周向平移铺层，轨迹线密集区域沿周向均匀分布，始终存在于圆柱壳的某一段区域；对于轴向平移铺层，轨迹线密集区域沿轴向均匀分布，始终存在于圆柱壳的某一侧区域。

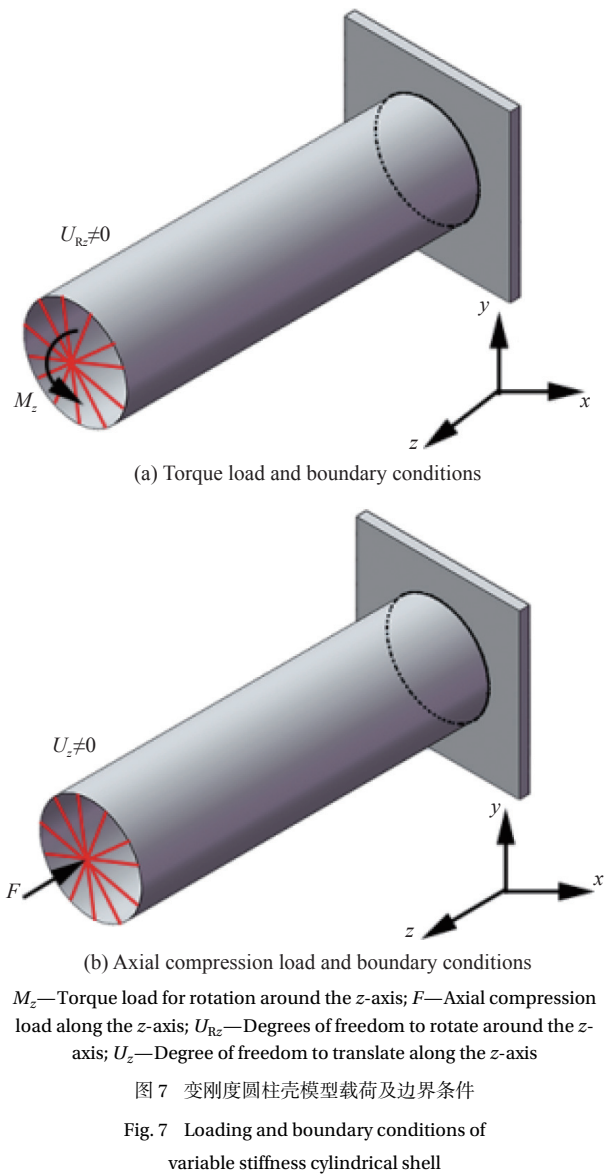
2 变刚度圆柱壳仿真分析

2.1 变刚度圆柱壳模型

分析模型选用长度 $L=2\,400\text{ mm}$ ，半径 $R=381.9\text{ mm}$ 的变刚度 (VS) 圆柱壳构件，图 7(a) 为圆柱壳受扭矩载荷及其边界条件，圆柱壳一端完全固定，载荷端只保留绕 z 轴旋转的自由度，扭矩 $M_z=100\text{ N}\cdot\text{mm}$ ；图 7(b) 为圆柱壳受轴压载荷及其边界条件，载荷端只保留沿 z 轴方向平移的自由度，轴压 $F=100\text{ N}$ 。

设定刚度 (CS) 圆柱壳铺层结构为 $[\pm 45/0/90]_{2s}$ ，设 $\varphi=<\alpha_0(\beta_1)(\beta_2)\alpha_1>$ ，用曲线纤维铺层 φ 代替 CS 圆柱壳中的 45° 直线铺层得到 VS 圆柱壳为 $[\pm\varphi/0/90]_{2s}$ 。当曲线纤维铺层 φ 的起始角和终止角都为 45° 时，VS 圆柱壳的铺层情况与 CS 圆柱壳相同。表 1 为三种圆柱壳构件的铺层结构及其名称。

所使用复合材料为 T300 碳纤维增强环氧树脂复合材料，纤维丝束宽度为 5 mm ，材料弹性参数见表 2。



利用 ABAQUS 软件对两种 VS 圆柱壳进行建模, 使用 S4R 单元, 共 8 层对称分布, 每层铺层厚度为 0.125 mm。图 8 为含 $\pm 25(0.6)(0.8)75^\circ$ 铺层的 VS 圆柱壳模型。其中图 8(a) 为 VSC 圆柱壳模型, 图 8(b) 为 VSA 圆柱壳模型。

2.2 变刚度圆柱壳线性屈曲分析

利用 ABAQUS 软件进行线性屈曲分析, 对 CS 圆柱壳分别施加扭矩及轴压载荷进行线性屈曲分析, 含 $\pm 25(\beta_1)(\beta_2)75^\circ$ 铺层的 VS 圆柱壳施加扭矩, 含 $\pm 65(\beta_1)(\beta_2)10^\circ$ 铺层的 VS 圆柱壳施加轴压载荷进行线性屈曲分析。以曲率半径为约束, 筛选出符合曲率半径约束的 VS 圆柱壳模型进行仿真分析。表 3 为 CS 圆柱壳的仿真结果。表 4 为 VS 圆柱壳模型在扭矩载荷下的线性屈曲分析结果。表 5 为

表 1 圆柱壳的铺层结构

Table 1 Laminate structure of cylindrical shell

Name	Layer structure
CS	$[\pm 45/0/90]_{2s}$
VSC	$[\pm \varphi/0/90]_{2s}$
VSA	$[\pm \varphi/0/90]_{2s}$

Notes: CS—Constant stiffness; VSC—Variable stiffness circumferential translation; VSA—Variable stiffness axial translation.

表 2 T300 碳纤维增强环氧树脂复合材料参数

Table 2 Parameters of T300 carbon fiber reinforced epoxy composite materials

E_1/MPa	E_2/MPa	ν_{12}	G_{12}/MPa	G_{13}/MPa	G_{23}/MPa
121 000	8 600	0.3	5 100	5 100	3 100

Notes: E_1, E_2 —Elastic modulus; G_{12}, G_{13}, G_{23} —Shear modulus of elasticity; ν_{12} —Poisson's ratio.

VS 圆柱壳模型在轴压载荷下的线性屈曲分析结果。

根据表 3~5 数据进行分析, 曲率半径约束为 700 mm 时, 扭矩载荷下, 含 $\pm 25(0.6)(0.8)75^\circ$ 铺层的 VSC 圆柱壳屈曲性能提升最大, 比 CS 圆柱壳高 18.75%; 轴压载荷下, 含 $\pm 65(0.4)(0.6)10^\circ$ 铺层的 VSC 圆柱壳屈曲性能提升最大, 达到了 10.34%。曲率半径约束为 650 mm 时, 受扭矩载荷的情况下, 含 $\pm 25(0.7)(0.8)75^\circ$ 铺层的 VSC 圆柱壳满足要求, 屈曲荷载系数为 100 074, 屈曲性能提升了 19.29%; 受轴压载荷的情况下, 含 $\pm 65(0.4)(0.5)10^\circ$ 铺层的 VSC 圆柱壳满足要求, 屈曲荷载系数为 1 694.9, 屈曲性能提升了 11.87%。受扭矩载荷的情况下, 控制点参数 β_1 越大, 圆柱壳中段小纤维角度铺放的区域越大, 本来集中在圆柱壳中段的载荷也由更大的区域来承载, 使圆柱壳能更好地承受扭矩载荷, 而控制点参数 β_2 越大, 纤维角度变化越靠近圆柱壳两端, 难以发挥纤维变角度铺放的作用。同理, 受轴压载荷的情况下, 控制点参数 β_1 越大, 圆柱壳中段大纤维角度铺放的区域越大, 圆柱壳中段承载轴压载荷的能力增强, 而控制点参数 β_2 小, 有利于发挥纤维变角度铺放的作用。因此, 当放宽曲率半径约束后, 受扭矩载荷圆柱壳的控制点参数 β_1 由 0.6 上升到 0.7, 受轴压载荷圆柱壳的控制点参数 β_2 由 0.6 下降到 0.5, 都得到了屈曲性能更好的圆柱壳。图 9 为曲率半径约束 650 mm 时, 上述圆柱壳在不同载荷下的一阶屈曲模态。

VSA 圆柱壳的刚度沿周向变化, 这使得 VSA

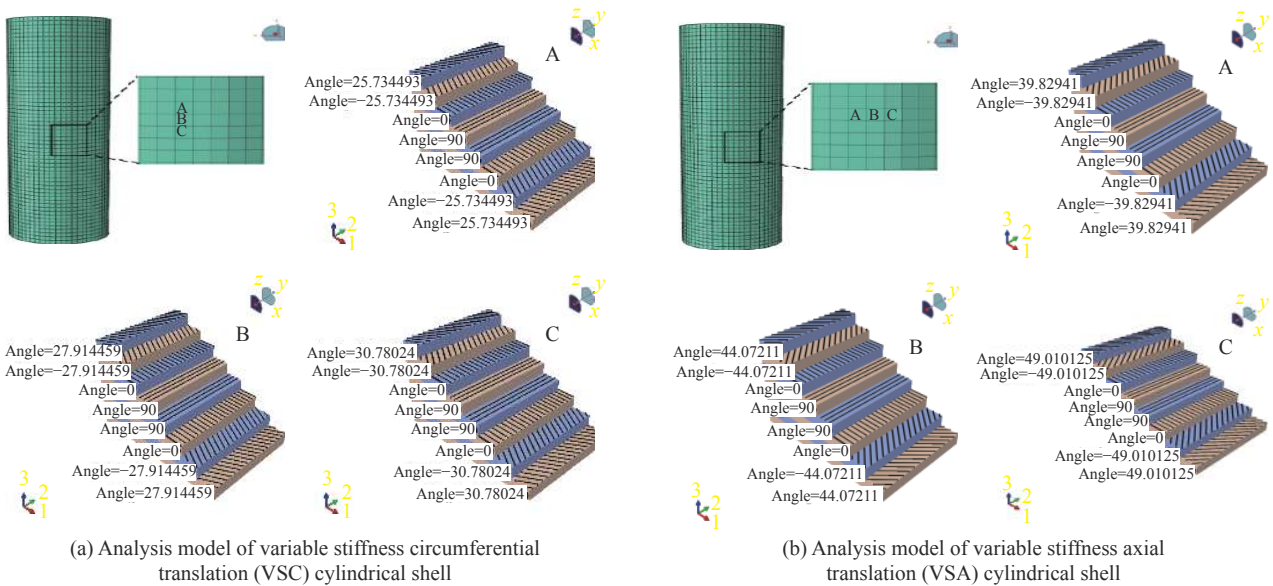


图 8 含±25(0.6)(0.8)75>铺层的变刚度 (VS) 圆柱壳分析模型

Fig. 8 Variable stiffness (VS) cylindrical shell analysis model with ±25(0.6)(0.8)75> layer

表 3 定刚度 (CS) 圆柱壳线性屈曲分析结果
Table 3 Linear buckling results of constant stiffness (CS) cylindrical shel

Load type	Buckling load coefficient
Axial compression load	1 515
Torque load	83 892

圆柱壳在刚度小的一侧承载能力弱；而 VSC 圆柱壳的刚度沿轴向变化，这使 VSC 圆柱壳能将载荷沿着圆周方向分散承载。因此 VSC 圆柱壳比 VSA 圆柱壳更有利于抵抗分布均匀的扭矩和轴压载荷。与 CS 圆柱壳相比，VSC 圆柱壳改变了载荷在圆柱壳上分布情况，通过圆周上的刚度调配，使圆柱壳能够承受更高的载荷。图 9(a) 中可以看出 VSC 圆柱壳利用了更大的区域来承受变形，而 VSA 圆

柱壳变形集中在圆柱壳的一侧。图 9(b) 中 VSC 圆柱壳通过调配刚度使圆柱壳中部抵抗变形的能力增强，而 VSA 圆柱壳依旧集中在圆柱壳的一侧。

曲率半径约束为 700 mm 时，通过调整权因子，受扭矩载荷 VSC 圆柱壳的屈曲载荷系数达到了 99 790，屈曲性能再次提高 0.2%，权因子分别为 $\omega_2=1.6$ 和 $\omega_3=1.1$ ；受轴压载荷 VSC 圆柱壳屈曲的载荷系数达到了 1 684.7，屈曲性能再次提高 0.86%，权因子分别为 $\omega_2=1.3$ 和 $\omega_3=1.3$ 。当曲率半径约束放宽至 650 mm 后，权因子的变化范围增大，受扭矩载荷 VSC 圆柱壳和轴压载荷 VSC 圆柱壳的屈曲载荷系数分别达到了 99 856 和 1 691.6，改进幅度由原先的 0.2% 和 0.86% 分别提升到了 0.28% 和 1.32%。

表 4 扭矩载荷下的变刚度 (VS) 圆柱壳线性屈曲分析结果
Table 4 Linear buckling results of variable stiffness (VS) cylindrical shell under torque load

Variable stiffness layer	Curvature radius R/mm	Buckling load coefficient of VSC	Buckling load coefficient of VSA
<25(0.1)(0.8)75>	≥ 700	97 430	75 501
<25(0.2)(0.8)75>		97 895	75 407
<25(0.3)(0.8)75>		98 324	75 414
<25(0.4)(0.8)75>		98 748	75 524
<25(0.4)(0.9)75>		95 811	78 504
<25(0.5)(0.8)75>		99 179	75 763
<25(0.5)(0.9)75>		96 501	78 160
<25(0.6)(0.8)75>		99 621	76 165
<25(0.6)(0.9)75>		97 188	77 939
<25(0.7)(0.9)75>		97 868	77 888
<25(0.8)(0.9)75>		98 533	78 058

表 5 轴压载荷下的 VS 圆柱壳线性屈曲分析结果

Table 5 Linear buckling results of VS cylindrical shell under axial compression load

Variable stiffness layer	Curvature radius <i>R</i> /mm	Buckling load coefficient of VSC	Buckling load coefficient of VSA
<65(0.1)(0.2)10>	≥700	1 558	1 316.8
<65(0.1)(0.3)10>		1 565.2	1 343.5
<65(0.1)(0.4)10>		1 571.9	1 363.1
<65(0.1)(0.5)10>		1 577.4	1 375.9
<65(0.2)(0.3)10>		1 598.9	1 354.9
<65(0.2)(0.4)10>		1 598.7	1 367.8
<65(0.2)(0.5)10>		1 596.6	1 374
<65(0.2)(0.6)10>		1 591.9	1 375.4
<65(0.2)(0.9)10>		1 553.4	1 367.7
<65(0.3)(0.4)10>		1 642.7	1 378.1
<65(0.3)(0.5)10>		1 631.6	1 380.6
<65(0.3)(0.6)10>		1 617.8	1 379.1
<65(0.3)(0.7)10>		1 601.8	1 375.1
<65(0.4)(0.6)10>		1 671.6	1 390.9
<65(0.4)(0.7)10>		1 647.4	1 386
<65(0.4)(0.8)10>		1 623	1 380.1

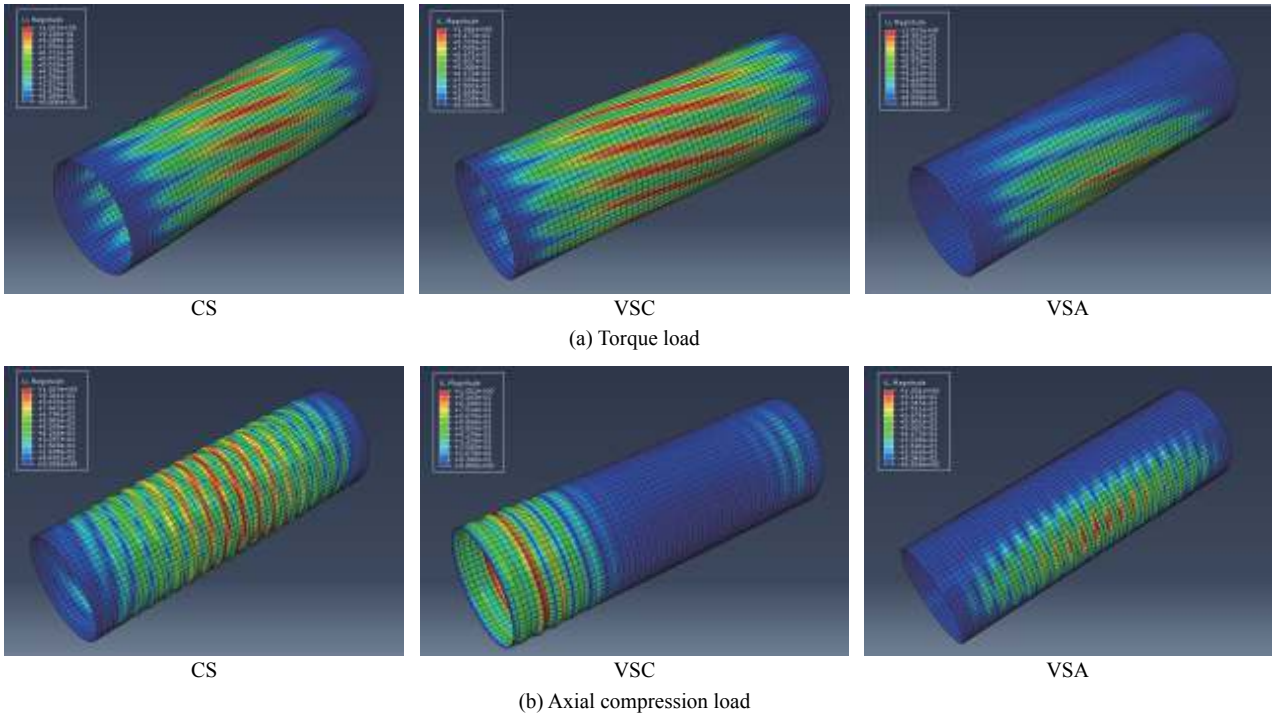


图 9 圆柱壳的一阶屈曲模态 ($R\geq650\text{ mm}$)

Fig. 9 The first order buckling mode of cylindrical shell ($R\geq650\text{ mm}$)

由上述所有结果可以看出，曲率半径限制了 VS 圆柱壳的轨迹规划。权因子 ω 需要依靠控制点参数 β 来发挥自己的作用，在曲率半径约束下，由起始角 α_0 、终止角 α_1 和控制点参数 β 控制曲线的总体形状，使复合材料圆柱壳的屈曲性能得到提升；同样由于曲率半径约束，权因子的变化范围有限，对纤维角度的分布规律进行局部调整，

使圆柱壳的屈曲载荷再次提高，但再次提高的幅度小于首次提高的幅度。

3 结论

(1) 以三次非均匀有理 B 样条 (NURBS) 曲线定义了纤维参考轨迹，给出了三次 NURBS 曲线的表达式，得到了初始纤维铺放轨迹，确定了变刚度 (VS) 圆柱壳铺层的表示形式，NURBS 曲线变角度

轨迹有着更大的设计性,能进一步提高圆柱壳的屈曲性能。

(2) 根据纤维初始参考轨迹沿轴向和周向平移的铺放方法,分别得到了沿轴向和周向平移的 VS 圆柱壳模型。对圆柱壳施加轴压和扭矩载荷进行屈曲分析,对比发现变刚度周向平移(VSC)圆柱壳的屈曲载荷明显提高。

(3) 曲率半径约束对 VS 圆柱壳的轨迹规划有着重要的影响,起始角、终止角和控制点参数决定曲线的总体形状,能得到抗屈曲能力较优异的 VS 圆柱壳;而改变权因子能对纤维角度的分布规律进行调整,使 VS 圆柱壳的屈曲载荷再次提高,但相对于调整其它参数而言,再次改进的幅度较小。

参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(1): 1-12.
DU Shanyi. Advanced composite material and aerospace engineering[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1): 1-12(in Chinese).
- [2] 韩振宇, 李玥华, 富宏亚, 等. 热塑性复合材料纤维铺放工艺的研究进展[J]. *材料工程*, 2012(2): 91-96.
HAN Zhenyu, LI Yuehua, FU Hongya, et al. Thermoplastic composites fiber placement process research[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012(2): 91-96(in Chinese).
- [3] 赵欣, 朱健健, 李梦, 等. 复合材料应用研究与产业发展建议[J]. *材料导报*, 2016, 30(S1): 525-530.
ZHAO Xin, ZHU Jianjian, LI Meng, et al. Research on composites application and industrial development suggestion[J]. *Materials Reports*, 2016, 30(S1): 525-530(in Chinese).
- [4] 陈绍杰. 大型飞机与复合材料[J]. *航空制造技术*, 2008(15): 32-37.
CHEN Shaojie. Large aircraft and composite[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008(15): 32-37(in Chinese).
- [5] 张小辉, 朱玉祥, 张少秋, 等. 先进复合材料自动铺丝技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(7): 54-58.
ZHANG Xiaohui, ZHU Yuxiang, ZHANG Shaoqiu, et al. Research progress on automated fiber placement technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(7): 54-58(in Chinese).
- [6] GÜRDAL Z, OLMEDO R. In-plane response of laminates with spatially varying fiber orientations: variable stiffness concept[J]. *AIAA Journal*, 1993, 31(4): 751-758.
- [7] GÜRDAL Z, TATting B, WU K. Tow-placement technology and fabrication issues for laminated composite structures[C]//Proceedings of the 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Austin, Texas: AIAA, 2005: 1-18.
- [8] WU Z, WEAVER P M, RAJU G, et al. Buckling analysis and optimisation of variable angle tow composite plates[J]. *Thin-Walled Structures*, 2012, 60: 163-172.
- [9] ALHAJAHMAD A, ABDALLA M M, GÜRDAL Z. Design tailoring for pressure pillowling using tow-placed steered fibers[J]. *Journal of Aircraft*, 2008, 45(2): 630-640.
- [10] ALHAJAHMAD A, ABDALLA M M, GÜRDAL Z. Optimal design of tow-placed fuselage panels for maximum strength with buckling considerations[J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47(3): 775-782.
- [11] MAROUENE A, BOUKHILI R, CHEN J, et al. Effects of gaps and overlaps on the buckling behavior of an optimally designed variable-stiffness composite laminates-A numerical and experimental study[J]. *Composite Structures*, 2016, 140: 556-566.
- [12] BLOM A W, STICKLER P B, GÜRDAL Z. Optimization of a composite cylinder under bending by tailoring stiffness properties in circumferential direction[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2010, 41(2): 157-165.
- [13] ROUHI M, GHAYOOR H, HOA S V, et al. Multi-objective design optimization of variable stiffness composite cylinders[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 69(69): 249-255.
- [14] ROUHI M, GHAYOOR H, HOA S V, et al. Effect of structural parameters on design of variable-stiffness composite cylinders made by fiber steering[J]. *Composite Structures*, 2014, 118: 472-481.
- [15] ROUHI M, GHAYOOR H, FORTIN-SIMPSON J, et al. Design, manufacturing, and testing of a variable stiffness composite cylinder[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 146-152.
- [16] KHANI A, ABDALLA M M, GÜRDAL Z. Circumferential stiffness tailoring of general cross section cylinders for maximum buckling load with strength constraints[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(9): 2851-2860.
- [17] 吴尘瑾, 祖磊, 李书欣, 等. 变刚度复合材料层复合板的纤维铺放路径设计及屈曲分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(4): 5-10.
WU Chenjin, ZU Lei, LI Shuxin, et al. Design of fiber placement path and buckling analysis of variable-stiffness composite laminates[J]. *Fiber Reinforcement Fiber/Composites*, 2018(4): 5-10(in Chinese).
- [18] 闫光, 韩小进, 阎楚良, 等. 复合材料圆柱壳轴压屈曲性能分析[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(3): 781-787.
YAN Guang, HAN Xiaojin, YAN Chuliang, et al. Buckling analysis of composite cylindrical shell under axial compression load[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 781-787(in Chinese).
- [19] 孙士平, 张冰, 邓同强, 等. 复合载荷作用变刚度复合材料回转壳屈曲优化[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(4): 1052-1061.
SUN Shiping, ZHANG Bing, DENG Tongqiang, et al. Buckling optimization of variable stiffness composite rotary shell under combined loads[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(4): 1052-1061(in Chinese).
- [20] 吴双华, 尹冠生, 陈童, 等. 变刚度圆柱壳屈曲分析及铺丝路径优化[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(3): 37-43.
WU Shuanghua, YIN Guansheng, CHEN Tong, et al. Buckling analysis of variable stiffness cylindrical shell and optimization of laying path[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(3): 37-43(in Chinese).
- [21] 邓同强. 变刚度复合材料层复合板的分析与优化[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
DENG Tongqiang. Analysis and optimization of laminated composite shells with variable stiffness[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017(in Chinese).
- [22] 赵志远. 基于机器人的热塑性复合材料铺放装备及工艺仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
ZHAO Zhiyuan. Research on robot-based placement equipment and process simulation of thermoplastic composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020(in Chinese).