

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.01.010

## 多轴向叶片预制体三维织造成形工艺研究

边金帅<sup>1</sup>, 王尧尧<sup>1,2</sup>, 孙正<sup>1</sup>, 郭子桐<sup>1</sup>, 檀晨晨<sup>3</sup>, 郭科宏<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学航空航天结构力学与控制全国重点实验室, 南京 210016; 3. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106)

**摘要:** 为实现复合材料多轴向叶片预制体三维织造成形, 开展多轴向复合材料预制体微观结构研究, 发现正交纱线与斜向纱线单层织造厚度存在差异, 提出三维模型非等厚度分层准则, 基于 Python 开发三维模型非等厚度切片测试程序, 对叶片模型进行切片测试, 获取每层纱线织造范围, 根据切片结果进行分层织造。试验结果表明, 根据非等厚度切片算法对三维模型进行切片所得到的各层织造轮廓进行织造可以实现样件预制体的近净成形, 对于多轴向异形构件近净成形具有重要工程意义。

**关键词:** 三维织造; 多轴向叶片; 碳纤维复合材料; 近净成形; 预制体

中图分类号: V254.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2025)01-0100-09

### Research on 3D Weaving Process of Multi-axial Blade Preforms

BIAN Jinshuai<sup>1</sup>, WANG Yaoyao<sup>1,2</sup>, SUN Zheng<sup>1</sup>, GUO Zitong<sup>1</sup>, TAN Chenchen<sup>3</sup>, GUO Kehong<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to achieve the three-dimensional weaving of the multi-axial composite preform of composites, the microstructure of the multi-axial composite preform is studied, finding that there is a difference in the thickness of the single layer woven with orthogonal yarns and oblique yarns. A non-uniform thickness layering criterion for the three-dimensional model is proposed. A three-dimensional non-uniform thickness slicing testing program is developed based on Python, and the slicing test is conducted on the blade model to obtain the weaving range of each layer of yarns. According to the slicing results, the layers are woven layer by layer. The experimental results show that the three-dimensional model can be sliced into layers according to the non-uniform thickness slicing algorithm, and the woven profile of each layer can be used for the near-net shaping of the preform, which has important engineering significance for the near-net shaping of multi-axial irregular components.

**Key words:** three-dimensional weaving; multi-axial blade; carbon fiber composite material; near-net shaping; preform

三维织造复合材料是由三维立体织物作为增强相, 树脂、金属和陶瓷等作为基体进行复合得到的复合材料<sup>[1]</sup>。与传统复合材料相比, 三维织造复

合材料具有高比强度、高比模量, 抗分层、高损伤容限、耐高温、耐疲劳等特点<sup>[2-4]</sup>。除此之外, 三维织造复合材料还具有可设计性强的优点<sup>[5]</sup>, 可用于实

基金项目: 航空发动机及燃气轮机基础科学中心重点项目(P2022-B-IV-014-001)。

收稿日期: 2024-10-25; 修订日期: 2024-11-27

通信作者: 王尧尧, 男, 副教授, E-mail: yywang\_cmee@nuaa.edu.cn。

引用格式: 边金帅, 王尧尧, 孙正, 等. 多轴向叶片预制体三维织造成形工艺研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(1): 100-108. BIAN Jinshuai, WANG Yaoyao, SUN Zheng, et al. Research on 3D weaving process of multi-axial blade preforms[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(1): 100-108.

现复杂异形构件近净成形,广泛应用于航空航天、交通运输等领域<sup>[6-8]</sup>。

随着复合材料在新一代航空飞行器上的应用逐步从非承力结构向主承力结构(包括发动机机匣、叶片、主机翼和机身等大型构件)扩展<sup>[9]</sup>,复合材料构件的大批量快速制造对新材料、新工艺和新装备提出了迫切需求。静子可调叶片是航空发动机的关键部件之一,直接关乎航空发动机的性能和稳定性<sup>[10-11]</sup>。航空发动机叶片的三维仿形预制体具有叶身厚度纵横双向均匀变化、叶片边缘厚度很小、叶身和榫头间厚度突变等结构特点<sup>[12]</sup>,因此其织造难度更大,性能要求也更高。

目前复合材料叶片预制体的主流织造工艺包括碳纤维布手工铺放、干铺丝和三维机织成形等工艺<sup>[13]</sup>。以上3种复合材料叶片预制体的织造工艺中较为成熟的是碳纤维布手工铺放工艺和干铺丝工艺,其中手工铺放技术的成熟度较高,而自动铺丝的优势主要在于工艺流程的自动化、高效化、精密化。通过碳布、干丝铺放工艺制备的复合材料叶片具有优异的韧性及抗损伤能力,但是二维铺层复合材料存在层间性能差的问题<sup>[14]</sup>。有学者基于三维机织工艺,研究了通过增减纱来实现纵横双向变厚度叶片预制体织造成形<sup>[15]</sup>,但传统三维机织制备预制体的纱线仅排布在X、Y和Z这3个方向,可设计性不足,构件的面内剪切性能有限。

陈江华等<sup>[16]</sup>针对复合材料在航空发动机进气机匣可调叶片上的应用需求,开展了工程应用研究,验证了采用3枚衬经斜纹2.5D工艺方案制备的复合材料可调叶片具有良好加工工艺性,满足强度要求。机械科学研究总院单忠德等<sup>[17-18]</sup>提出了一种三维计算机辅助设计(Computer aided design, CAD)模型驱动的复合材料构件数字化柔性导向三维织造成形方法,通过逐层织造实现复合材料预制体降维织造成形。刘云志等<sup>[19]</sup>对预制体的几何结构和纤维束细观形貌进行了研究,建立了预制体几何结构模型,并通过织造实验验证了模型的合理性。黄浩等<sup>[20]</sup>深入探究柔性导向三维织造技术的织造机理,提出分区域织造的工艺方案,通过分段拟合逼近截面形状,有效解决了复杂异形截面构件成形难的问题。

传统的柔性导向三维织造复合材料中面内仅有沿 $0^\circ$ 方向和 $90^\circ$ 方向的正交纱线,和三维机织一样存在面内剪切性能相对薄弱的问题。本文在基于柔性导向三维织造技术的预制体制备过程中引入面内的 $45^\circ/-45^\circ$ 的斜向纱线,形成面内准各向同性的多轴向三维织造复合材料结构,以改善其抗剪切、抗扭转性能。

柔性导向三维织造工艺具有逐层织造的特

点<sup>[21]</sup>,对于变截面异形构件的织造成形,首先需要根据织造层厚对构件三维模型进行分层切片以提取各个织造截面的轮廓。目前仍缺乏针对柔性导向三维织造工艺的切片分层算法,多轴向变截面异形构件预制体的织造成形受到了限制。本文针对柔性导向三维织造工艺多轴向构件织造过程中层厚不一致的情况,提出一种非等厚度分层切片算法,其特点是根据设计的纤维排布方向确定对应的单层厚度,以该单层厚度列表为依据进行分层切片,获取各个织造平面的轮廓。

目前三维模型切片分层算法可分为两种,一种是等层厚的分层切片算法,另一种是自适应层厚的分层切片算法<sup>[22-24]</sup>。3D打印中的等厚分层切片算法指的是以单一层厚作为分层依据,相邻切片间的距离为固定值,分层过程较为简单;但是当三维模型切片方向曲率变化较大或者打印倾角较小时使用等厚分层会出现台阶效应,影响产品质量和精度,因此在等厚分层切片的基础上提出自适应分层切片算法,即在三维模型切片方向曲率变化较大或者打印倾角较小的情况下采用较小层厚分层以消除打印台阶效应。

王春香等<sup>[25]</sup>提出了一种对模型进行等厚分层的算法,将只与分层切片平面相交的三角形面片提取出来,然后直接计算获得交线与交点,无需建立局部拓扑信息,快速输出轮廓线,提高了计算效率。弋英民等<sup>[26]</sup>提出了一种改进的保留立体光刻(STereoLithography, STL)模型特征细节的自适应分层算法,该算法减小了阶梯效应以及模型特征丢失和偏移对打印质量的影响,提高了模型的打印精度。Wang等<sup>[27]</sup>提出一种自适应分层算法,该算法可以协调打印质量和效率的优化,以满足不同的打印需求。

本文首先探究了在XY平面内引入斜向纱线后柔性导向三维织造复合材料多轴向构件的细观结构变化,随后制备多轴向平板样件,通过统计计算机断层扫描(Computed tomography, CT)结果中的正交纱线和斜向纱线的单层厚度,验证了多轴向复合材料构件中正交纱线与斜向纱线单层织造厚度存在较大差异。进而针对多轴向构件中斜向纱线与正交纱线单层织造厚度不一致的特点进行非等厚度切片程序开发,随后建立可调静子叶片三维模型,将可调静子叶片三维模型展平后进行三维模型的非等厚度切片分层及轮廓提取,根据提取的切片轮廓进行叶片预制体织造成形,后续进行预制体固化得到可调静子叶片构件。最后采用激光扫描技术获取叶片构件外形的点云数据,与所建立的叶片三维模型进行对比,验证非等厚度切片程序的

可行性和准确性,验证所提出的多轴向叶片仿形制备工艺的可行性,为柔性导向三维织造技术应用于多轴向复合材料异形构件的制备提供支撑。

## 1 柔性导向三维织造非等厚切片轮廓提取问题分析

柔性导向三维织造技术的工艺流程为:首先将所需织造的预制体三维模型根据分层厚度进行分层切片,获取各个织造层的轮廓信息后,根据织造需求布置导向阵列,在由导向棒组成的导向阵列间隙中按照分层切片信息及设计的纱线取向逐层铺放纤维丝束,完成XY平面的织造后进行压实致密处理,随后进行Z向纱线替换植入,将Z方向的导向棒全部替换成纱线,完成整个预制体的织造。

柔性导向三维织造技术逐层织造的特点有利于实现复合材料变截面变厚度构件的近净成形。本研究中,为增强复合材料构件的面内剪切性能,在 $0^\circ/90^\circ$ 正交纱线的基础上引入 $45^\circ/-45^\circ$ 的斜向纱线,按照 $0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ$ 的纱线取向循环进行织造。图1为含斜向纱线的柔性导向三维织造预制体示意图。

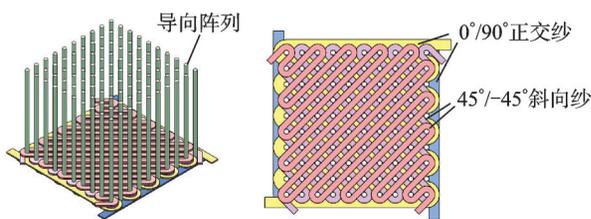


图1 含斜向纱线的柔性导向三维织造预制体示意图  
Fig.1 Schematic illustration of a flexible guided 3D woven preform featuring skew yarn

应用柔性导向三维织造技术所制备的预制体的内部结构具有重复性、周期性,为了便于分析,可以将柔性导向三维织造技术所制备的预制体结构进行简化,对预制体结构中的特征单元体进行分析。图2为柔性导向三维织造预制体的特征单元体,其中 $d$ 为导向阵列间距, $r$ 为导向棒半径, $a$ 为正交纱线在导向阵列约束下的宽度, $b$ 为斜向纱线在导向阵列约束下的宽度。

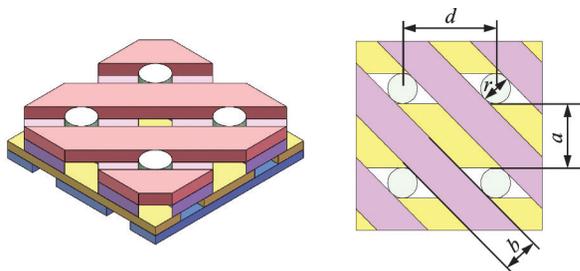


图2 柔性导向三维织造预制体的特征单元体  
Fig.2 Feature unit of a flexible guided 3D woven preform

在柔性导向三维织造过程中,纱线会在导向阵列的约束下堆叠在导向棒的间隙内。可以发现,在理想状态下,同一导向阵列中正交纱线和斜向纱线所受空间约束不同。对于正交纱线来说,导向阵列的间隙 $a$ 为

$$a = d - 2 \times r \quad (1)$$

对于斜向纱线来说,导向阵列的间隙 $b$ 为

$$b = \frac{\sqrt{2}}{2} d - 2 \times r \quad (2)$$

理想情况下,当纱线宽度 $w$ 小于导向棒间隙时,纱线会平铺在导向棒间隙内;当纱线宽度 $w$ 大于导向棒间隙时,纱线会在宽度方向翻折,纱线会堆叠在导向棒间隙内,图3为理想状态下纱线状态示意图。当预制体中仅包含一类(正交纱线或斜向纱线)时,预制体织造过程中每层纱线的高度相同;而在含有正交纱线的基础上引入斜向纱线进行混合交替织造时,在同一导向阵列中,斜向纱线所受到的约束与正交纱线所受到的约束不同,即斜向纱线堆叠部分会大于正交纱线,进而引起导向阵列中正交纱线的单层高度与斜向纱线的单层高度产生差异。

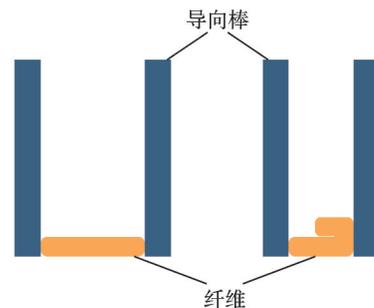


图3 理想状态下纱线状态示意图  
Fig.3 Diagram of yarn state in ideal condition

因此,在进行仅包含 $0^\circ/90^\circ$ 正交纱线的预制体织造时,仅需要将所需成形的预制体三维模型根据唯一的单层纱线厚度进行等厚分层切片,提取每层轮廓然后进行织造;然而在包含 $0^\circ/90^\circ$ 正交纱线和 $45^\circ/-45^\circ$ 斜向纱线的预制体织造成形时,由于正交纱线和斜向纱线单层厚度不同,为提高织造成形精度,需要按照不同的单层纱线厚度进行非等厚度分层切片轮廓提取然后进行织造。目前的等厚度分层切片和自适应分层切片软件无法适配引入斜向纱线后的预制体三维模型切片需求。

## 2 非等厚度切片轮廓提取

针对柔性导向三维织造技术的非等厚度切片轮廓提取程序是基于Python 3.11配置OpenGL函数库来实现开发的,其主要功能包括文件读取、获取用户输入切片基准面和切片间距、切片轮廓计算

提取、切片数据保存及可视化。按照文件格式来分,目前切片分层主要包括基于CAD三维模型直接分层和基于三维模型STL文件的切片分层,基于CAD三维模型直接分层切片算法精度较高,但由于兼容性差而没有得到广泛应用<sup>[28]</sup>。而目前STL文件是目前使用最广泛的文件格式。因此,本研究选择STL文件作为导入的3D模型的文件格式。

变截面变厚度多轴向预制体的非等厚度切片轮廓提取程序流程如图4所示。

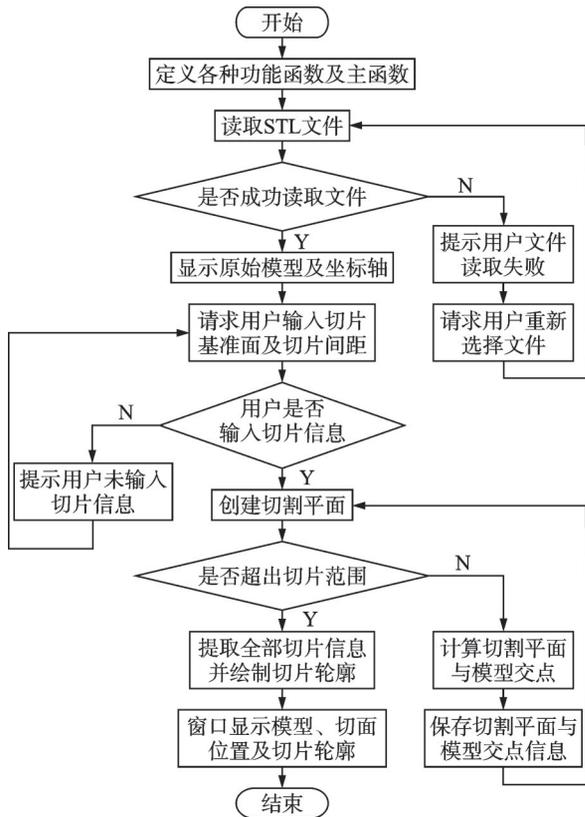


图4 非等厚度切片轮廓提取程序流程

Fig.4 Procedure for contour extraction of non-equal thickness slices

### 2.1 切片预处理

切片预处理主要包括开发环境配置、模型读取及模型预处理。

首先导入计算及切片结果可视化所需要的模块和函数库,包括VTK模块、NumPy函数库和Matplotlib函数库。随后使用vtkSTLReader函数读取三维模型文件,STL文件是用大量的三角面片连接包裹起来表示三维模型的一种文件格式,每个三角面片均可以由3个点坐标及一个向量表示。

读取模型后首先计算模型的边界范围,通过GetPoints函数提取所有三角面片的顶点坐标后存储至矩阵point,分别使用max函数、min函数寻找X方向的最大值 $x_{max}$ 和最小值 $x_{min}$ ,从而确定模型边

界的X方向范围 $[x_{min}, x_{max}]$ ,表达式为

$$x_{min} = \min(\text{point}.x) \quad (3)$$

$$x_{max} = \max(\text{point}.x) \quad (4)$$

同理可以求出模型边界的Y方向和Z方向的范围 $[y_{min}, y_{max}]$ 、 $[z_{min}, z_{max}]$ ,更进一步可以求取X方向切片距离为

$$h_x = x_{max} - x_{min} \quad (5)$$

同理可以求解出模型边界Y方向和Z方向的距离大小 $h_y$ 、 $h_z$ 。通过计算模型边界从而确定模型的切片区域,图5为模型导入及计算切片区域示意。

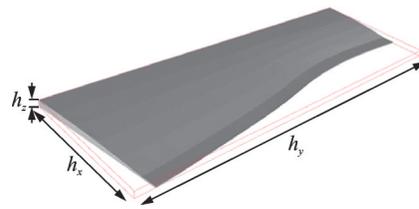


图5 模型导入及计算切片区域示意

Fig.5 Model import and calculation of slice area schematic

### 2.2 用户交互、切片计算

切片处理主要包括获取切片需求、计算切片数据。

根据所选构件的织造方向生成切片基准平面,切片基准平面可以用平面的法向量和原点位置表示,以平行于XY平面的基准平面为例,其法向量为 $N=[0, 0, 1]$ ,原点位置为 $O=[x_{min}, y_{min}, z_{min}]$ ,同理可以表示平行于YZ、XZ平面的切片基准平面。

通过在切片基准平面上依次累加切片间距来计算全部切片平面的位置,读取用户输入的切片间距列表 $S=[s_1, s_2, \dots, s_n]$ ,列表长度为 $n$ ,当前切片平面 $P$ 的原点为 $O$ ,法向量为 $N$ ,切片间距为 $s_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),为了循环读取切片间距列表 $S$ 中的数据,可以使用取模运算来更新索引 $i$ ,计算表达式为

$$i = (i + 1) \% n \quad (6)$$

则更新后的切片平面 $P'$ 的原点坐标 $O'$ 为

$$O' = O + s_i \times N \quad (7)$$

已切片的距离为 $L$ ,计算更新后的切片距离 $L'$ 为

$$L' = L + s_i \quad (8)$$

同时为确保切片平面位置不会超出三维模型切片范围,需保证

$$L' \leq h_x \quad (9)$$

经过上述计算得到所有切片平面的集合 $R_p$ ,生成切片平面后计算各个切片平面与三维模型的三角面片集合 $R_m$ 的交集 $R_1$ ,表达式为

$$R_1 = R_p \cap R_m \quad (10)$$

VTK函数库中的vtkCutter类可以将一个平

面投影到输入数据集上,并返回与该平面相交的几何对象的子集。使用 vtkCutter 创建切割对象,将读取的模型作为输入数据集设置为输入连接,将切片平面设置为切割函数,生成裁剪后的数据集。随后使用 GetLines 函数提取数据集中的线条信息,得到各个切片平面与三维模型的相交轮廓线。

### 2.3 切片结果保存与可视化

使用 Matplotlib 函数库中的 plt.plot 函数绘制所提取的线条即得到切片平面与模型相交的轮廓,使用 plt.savefig 将所绘制图形保存为 png 文件输出,保存到指定文件夹。最后将切片结果进行可视化显示,使用 VTK 函数库中的相关函数创建渲染器,将读取的模型、切片平面位置及切片轮廓显示在窗口中,供用户查看。

## 3 实验及结果

### 3.1 正交纱线与斜向纱线厚度差异验证实验

选用日本东丽 T700-12K 碳纤维,在导向棒直径为 1.3 mm、导向棒中心距为 4.2 mm 的导向阵列中进行织造,以纱线取向为  $0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ$  的循环作为一个织造层,完成 3 个织造层后使用替纱针携带  $2 \times T700-12K$  碳纤维在 Z 方向对导向棒进行原位替换,完成 Z 向纱线植入。对制备的平板件进行压实致密处理,选择 AM-8927A 环氧树脂作为基体,在烘箱中进行固化,固化条件为  $50^\circ\text{C}$  保温 6 h、 $100^\circ\text{C}$  保温 3 h,将所得平板件切制为  $20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的试样进行 CT 扫描,扫描仪分辨率为  $20\ \mu\text{m}$ 。图 6(a) 为扫描结果三维图,图 6(b) 为水平视角纤维形貌。

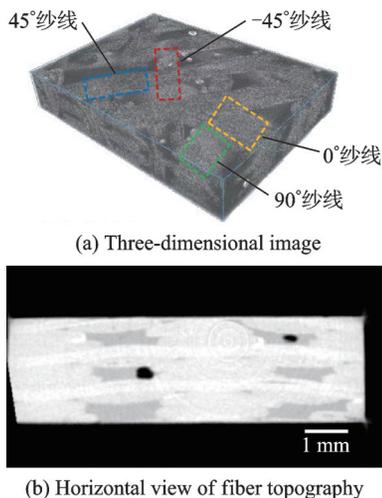


图 6 试样 CT 扫描结果

Fig.6 CT scan results of the specimen

选择 18 个采样点,使用 imagej 软件分别测量  $0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ$  纱线的单层厚度,数据统计结果如表 1 所示,图 7 为各向纱线厚度统计折线图。

表 1 纱线单层厚度测量

Table 1 Single layer thickness measurement of the yarn

序号	纱线厚度/mm			
	$0^\circ$ 方向	$90^\circ$ 方向	$45^\circ$ 方向	$-45^\circ$ 方向
1	0.327	0.299	0.411	0.422
2	0.320	0.329	0.390	0.399
3	0.263	0.271	0.387	0.362
4	0.338	0.315	0.394	0.378
5	0.306	0.289	0.376	0.366
6	0.320	0.310	0.375	0.362
7	0.341	0.324	0.406	0.411
8	0.289	0.333	0.394	0.403
9	0.263	0.280	0.368	0.397
10	0.320	0.298	0.385	0.397
11	0.315	0.320	0.420	0.394
12	0.294	0.268	0.399	0.390
13	0.310	0.333	0.390	0.420
14	0.327	0.320	0.425	0.415
15	0.268	0.271	0.390	0.385
16	0.303	0.315	0.415	0.420
17	0.285	0.275	0.420	0.387
18	0.268	0.280	0.415	0.408
平均值	0.303 2	0.301 7	0.397 8	0.395 3

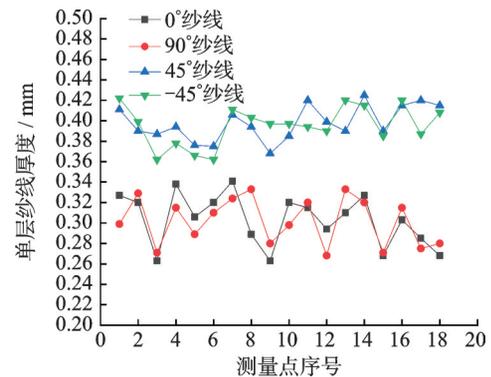


图 7 各向纱线厚度统计折线图

Fig.7 Statistical line chart of yarn thickness in all directions

计算  $0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ$  纱线的平均单层厚度。 $0^\circ$  纱线平均单层厚度为 0.303 2 mm,  $90^\circ$  纱线平均单层厚度为 0.301 7 mm,  $45^\circ$  纱线平均单层厚度为 0.397 8 mm,  $-45^\circ$  纱线平均单层厚度为 0.395 3 mm。可以发现,  $0^\circ/90^\circ$  正交纱线平均厚度差距为 0.001 5 mm, 二者厚度相当接近, 可以认为  $0^\circ$  纱线和  $90^\circ$  纱线单层厚度一致, 其平均厚度为 0.302 mm;  $45^\circ/-45^\circ$  斜向纱线的平均厚度差距为 0.002 5 mm, 二者厚度几乎相同, 可以认为  $45^\circ$  和  $-45^\circ$  纱线的单层厚度一致, 其平均厚度为 0.397 mm。但是, 正交纱线和斜向纱线的平均厚度差距较大, 为 0.095 mm, 通过计算可以发现斜向纱线的单层厚度比正交纱线的单层厚度大 31.46%。

### 3.2 可调静子叶片样件织造实验

使用三维建模软件 solid works 将静子可调叶片三维模型进行钣金展平以便切片分层,图 8 为叶片模型展平前后示意图。

将展平后的三维模型保存为 STL 文件后导入切片程序,运行程序,选择 XY 平面为切片基准平面,根据上述平板件测得的正交纱线与斜向纱线单层厚度,输入切片间距列表为 [0.3,0.3,0.4,0.4],



图 8 叶片模型展平前后

Fig.8 Blade model flattens before and after

进行计算,切片后得到 21 个切片平面,图 9 为切片结果。

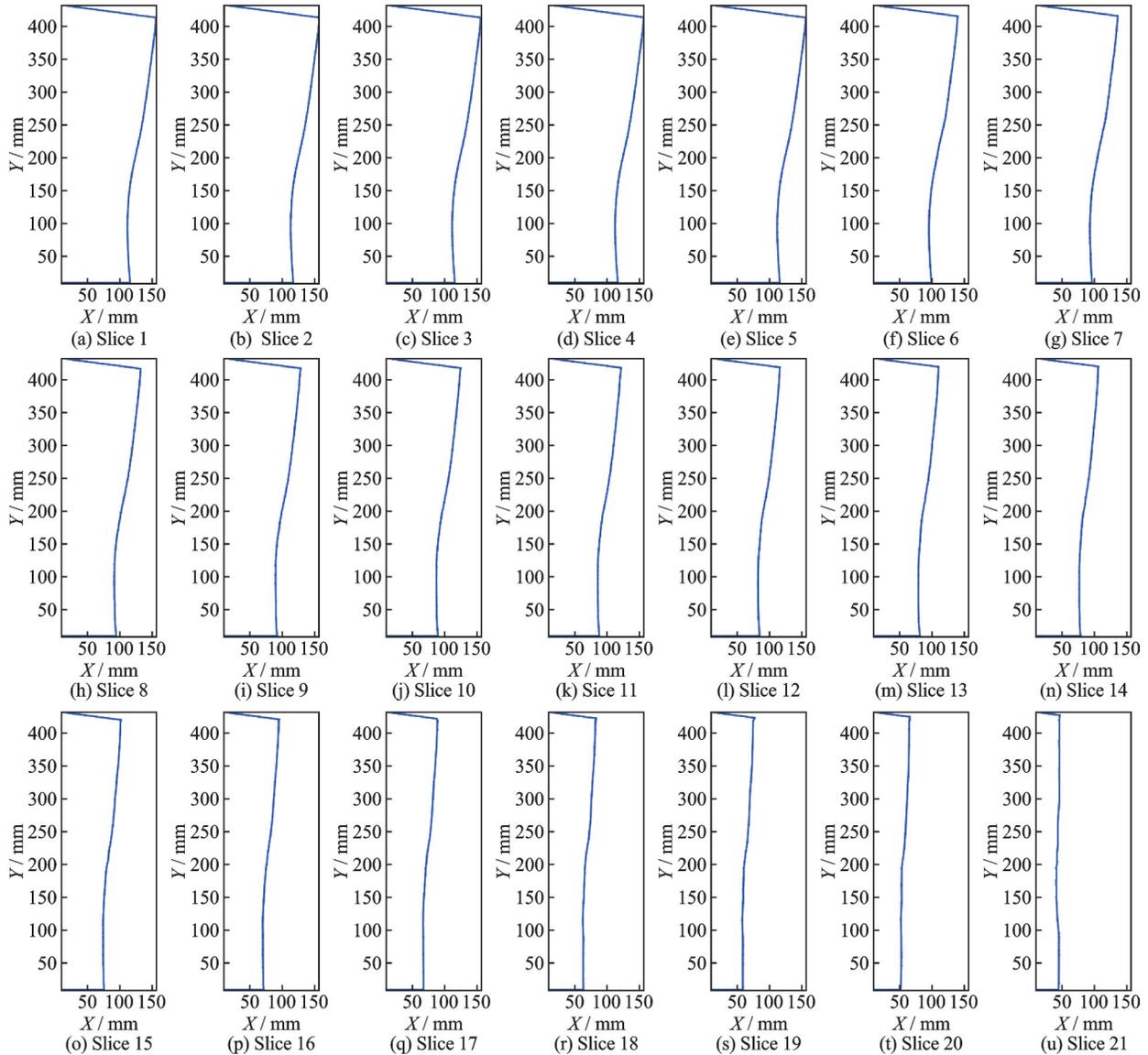
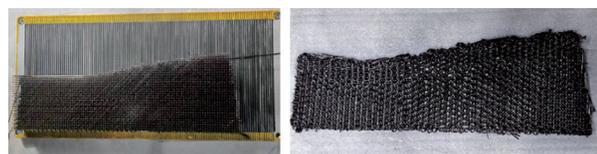


图 9 切片结果

Fig.9 Slice results

选取 T700-12K 碳纤维,导向阵列参数为:导向棒直径 1.3 mm,导向棒中心距 4.2 mm,按照 0°/90°/45°/-45°的循环纱线取向进行试验,分别按照切片得到的轮廓进行逐层织造,完成 XY 方向织造后,利用替纱针携带 2×T700-12K 碳纤维在 Z 方向完成对导向阵列钢针的原位替换,将纤维束植入至预制体中,直至导向阵列全部替换为碳纤维,即完成静子叶片预制体织造成形。图 10(a)为导向阵

列,图 10(b)为所制备的可调静子叶片预制体。



(a) Guided array

(b) The prepared adjustable stator blade preform

图 10 静子叶片预制体制备

Fig.10 The stator blade prepared by prefabrication

对所得到的预制体边缘进行修形、压实致密处理后,选择 AM-8927A 环氧树脂作为基体,在烘箱中进行固化,固化条件为 50℃保温 6 h、100℃保温 3 h,得到如图 11 所示的可调叶片构件。



图 11 可调叶片构件

Fig.11 Adjustable blade member

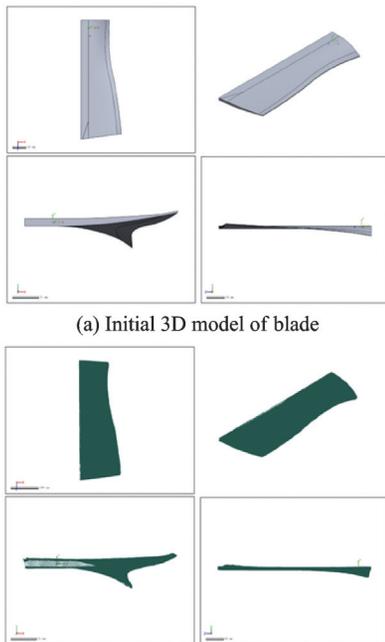
使用型创手持三维激光扫描仪 Hand scan700,其测量精度为 0.03 mm,分辨率为 0.05 mm,测量速率为 480 000 次/秒,对得到的样件进行扫描,使用配套软件采集数据,叶片扫描过程如图 12 所示。



图 12 叶片激光扫描

Fig.12 Laser blade scanning

去除噪点后获得样件的点云数据,使用 geomagic control 软件进行点云数据与初始叶片三维模型对比。图 13(a)为叶片初始三维模型,图 13(b)为叶片扫描点云数据。对比结果如图 14 所示。对比误差统计如图 15 所示。



(b) Blade scanning point cloud data

图 13 叶片三维信息

Fig.13 Blade 3D information

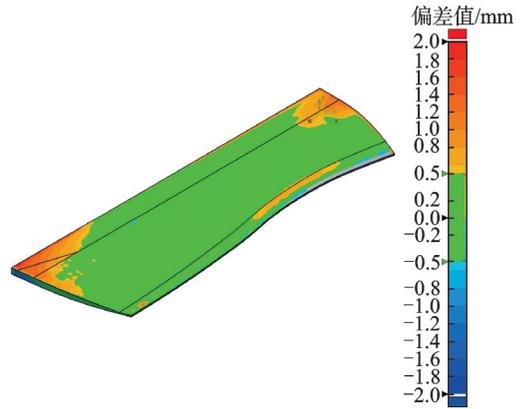


图 14 叶片三维模型与扫描点云数据对比结果

Fig.14 Comparison of 3D blade model and scanning point cloud data

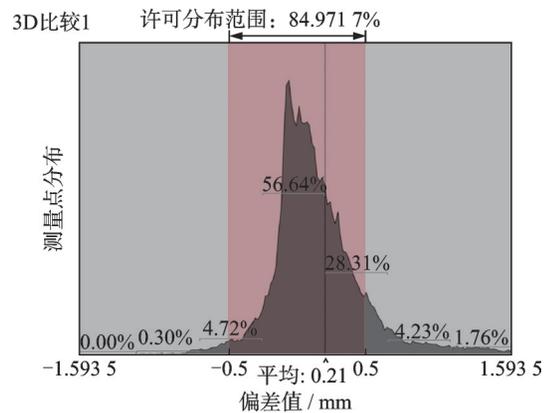


图 15 对比误差统计图

Fig.15 Compare error statistics

叶片初始三维模型与激光扫描的点云数据对比结果表明,制备的叶片 84.971 7% 左右的区域与所设计的数模误差在 0.5 mm 以内,满足后期对叶片进行修形的要求。

## 4 结 论

(1) 通过对导向阵列中不同方向纱线所受空间约束的几何分析,得出在同一导向阵列中正交纱线和斜向纱线所受导向棒的约束间隙不同,会导致正交纱线所在织造层和斜向纱线所在织造层的高度不同,实验探究得出在导向棒直径为 1.3 mm,导向棒中心距为 4.2 mm 时 T700-12K 碳纤维斜向纱线的单层厚度比正交纱线的单层厚度大 31.46%,证明在多轴向构件预制体三维织造时,正交纱和斜向纱单层厚度存在差异。

(2) 基于 Python 开发了非等厚度切片程序,主要功能包括 STL 文件读取、输入切片基准面和切片间距、生成全部切片平面间距、切片轮廓计算提取、切片数据保存及切片结果可视化。实现了变曲率变厚度三维模型非等厚度切片轮廓提取,为多轴向构件三维织造成形过程精确控制提供依据。

(3) 应用本文提出的非等厚度切片算法进行多轴向叶片预制体样件三维织造,构件三维测量结果表明,制备的叶片 84.971 7% 的区域与所设计的数模误差在 0.5 mm 以内,满足后期对叶片进行修形的要求。证明上述工艺流程及切片算法具有较高的准确性,可以实现可调静子叶片高精度仿形制备,为柔性导向三维织造技术应用于多轴向异形构件制备提供支持。

#### 参考文献:

- [1] 代彦彦, 张国利. 现代纺织复合材料概述[J]. 纺织科技进展, 2020, 4: 1-8, 16.  
DAI Yanyan, ZHANG Guoli. Overview of modern textile composites[J]. Progress in Textile Science and Technology, 2020, 4: 1-8, 16.
- [2] 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 composites and aerospace[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [3] GUO Z T, HUANG H, SHAN Z D, et al. A digital implantation system for Z-direction yarn of three-dimensional preform based on flexible oriented woven process[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 116: 105385.
- [4] 王显峰, 阳铭广, 刘琛, 等. 变刚度复合材料层合板研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(1): 17-30.  
WANG Xianfeng, YANG Mingguang, LIU Chen, et al. Research progress of variable stiffness composite laminates[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(1): 17-30.
- [5] 檀晨晨, 单忠德, 孙正, 等. 预制体织造过程的数字单元法模拟研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 889-898.  
TAN Chenchen, SHAN Zhongde, SUN Zheng, et al. Research on digital element method simulation of weaving process of preforms[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 889-898.
- [6] 单忠德, 刘阳, 范聪泽, 等. 复合材料预制体成形制造工艺与装备研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(23): 2774-2784, 2831.  
SHAN Zhongde, LIU Yang, FAN Congze, et al. Research on manufacturing process and equipment of composite preform[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(23): 2774-2784, 2831.
- [7] SUN Z, SHAN Z D, SHAO T M. A comparative study for the thermal conductivities of C/SiC composites with different preform architectures fabricating by flexible oriented woven process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 170: 120973.
- [8] LI M R, WANG P, BOUSSU F, et al. A review on the mechanical performance of three-dimensional warp interlock woven fabrics as reinforcement in composites [J]. Journal of Industrial Textiles, 2022, 51(7): 1009-1058.
- [9] 单忠德, 周征西, 孙正, 等. 航空航天先进复合材料三维预制体成形技术与装备研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 64-79.  
SHAN Zhongde, ZHOU Zhengxi, SUN Zheng, et al. Research on 3D prefabrication technology and equipment for aerospace advanced composite materials [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 64-79.
- [10] 陈利, 陈冬, 容治军, 等. 涡轮发动机复合材料叶片用增强织物研究进展[J]. 天津工业大学学报, 2018, 37(6): 30-35.  
CHEN Li, CHEN Dong, RONG Zhijun, et al. Research progress of reinforced fabric for turbine engine composite blades[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2018, 37(6): 30-35.
- [11] SHAOHENG F. Application and analysis of composite materials in actuation system for commercial aircraft engine[C]//Proceedings of the 2021 13th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Beihai, China: IEEE, 2021: 5-8.
- [12] 关留祥, 李嘉禄, 焦亚男, 等. 航空发动机复合材料叶片用 3D 机织预制体研究进展[J]. 复合材料学报, 2018, 35(4): 748-759.  
GUAN Liuxiang, LI Jialu, JIAO Yanan, et al. Review of 3D woven preforms for the composite blades of aero engine [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 748-759.
- [13] 周何, 李小兵, 张婷, 等. 航空发动机复合材料风扇叶片制造工艺应用进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(13): 84-91.  
ZHOU He, LI Xiaobing, ZHANG Ting, et al. Progress in manufacturing process of composite fan blades for aero-engines[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 84-91.
- [14] ELKINGTON M P, WARD C, POTTER K D. Automated layup of sheet prepregs on complex moulds [C]//Proceedings of the International SAMPE Technical Conference. Long Beach, USA: SAMPE, 2016.
- [15] 郭军, 马颜雪, 胡吉永, 等. 纵横双向变厚度三维机织物组织设计[J]. 产业用纺织品, 2016, 34(6): 8-12.  
GUO Jun, MA Yanxue, HU Jiyong, et al. Design of three-dimensional woven fabric with variable thickness [J]. Industrial Textiles, 2016, 34(6): 8-12.

- [16] 陈江华, 许洪明. 复合材料在进气机匣可调叶片上应用研究[J]. 纤维复合材料, 2021, 38(2): 59-64.  
CHEN Jianghua, XU Hongming. Application of composite materials on adjustable blades of air intake casing [J]. Fiber Composite Materials, 2021, 38(2): 59-64.
- [17] 单忠德, 战丽, 缪云良, 等. 复合材料构件数字化精确成形技术与装备[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 63-67.  
SHAN Zhongde, ZHAN Li, MIAO Yunliang, et al. Technology and equipment of digital precision forming of composite components[J]. Science and Technology Review, 2020, 38(14): 63-67.
- [18] SHAN Z D, CHEN S, ZHANG Q, et al. Three-dimensional woven forming technology and equipment [J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(12): 1587-1594.
- [19] 刘云志, 战丽, 王争, 等. 柔性导向三维织造复合材料预制体细观结构分析[J]. 中国材料进展, 2020, 39(6): 458-463.  
LIU Yunzhi, ZHAN Li, WANG Zheng, et al. Microstructure analysis of prefabricated 3D woven composites with flexible guidance[J]. Advances in Materials in China, 2020, 39(6): 458-463.
- [20] 黄浩, 单忠德, 张丽娇, 等. 异形截面复合材料构件成形及力学性能预测方法研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(2): 107-118.  
HUANG Hao, SHAN Zhongde, ZHANG Lijiao, et al. Research on forming and mechanical properties prediction method of deformed section composite members [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(2): 107-118.
- [21] GUO Z T, SHAN Z D, HUANG J H, et al. Study on the distribution of frictional forces on Z-yarn continuous implanted preforms and their applications[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1): 62.
- [22] 雷聪蕊, 葛正浩, 魏林林, 等. 3D打印模型切片及路径规划研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(3): 24-32.  
LEI Congrui, GE Zhenghao, WEI Linlin, et al. Research review on 3D printing model slicing and path planning[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(3): 24-32.
- [23] TIAN J R. A review of 3D printing slicing algorithms [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Signal Processing and Machine Learning (CONF-SPML 2024). Chicago, USA: SPIE, 2024: 135-141.
- [24] ALKADI F, LEE K C, BASHIRI A H, et al. Conformal additive manufacturing using a direct-print process[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 100975.
- [25] 王春香, 郝志博. 快速成型技术 STL 模型等厚分层算法研究[J]. 机械设计与制造, 2014(4): 133-136.  
WANG Chunxiang, HAO Zhibo. Research on equal thickness layering algorithm of rapid prototyping technology STL model[J]. Machine Design & Manufacture, 2014(4): 133-136.
- [26] 弋英民, 李迎国, 刘柏均, 等. 保留 STL 模型特征细节的 3D 打印自适应分层算法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(8): 105-114.  
YI Yingmin, LI Yingguo, LIU Baijun, et al. Adaptive layering algorithm for 3D printing with STL model feature retention[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(8): 105-114.
- [27] WANG X Q, CAO J F, CAO Y. A new multiobjective optimization adaptive layering algorithm for 3D printing based on demand-oriented[J]. Rapid Prototyping Journal, 2023, 29(2): 246-258.
- [28] GUAN Y, SUN X, JIN L, et al. Development of 3D printing entity slicing software[J]. China Foundry, 2021, 18(6): 587-592.

(编辑:陈璐,王婕)