

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.02.001

基于偏心理论的异型构件编织工艺推理方法

崔博^{1,2}, 阳海棠³, 李麒阳⁴, 俞建勇¹

(1. 东华大学 纺织科技创新中心, 上海 201620; 2. 东华大学 物理学院, 上海 201620; 3. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610073; 4. 东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 为实现复合材料异型构件编织预成型体的精确自主生产, 提出了一种基于偏心理论的异型构件编织工艺推理方法, 提出编织的偏心参数并分析偏心下纱线的沉积规律, 基于收敛长度随时间的响应函数建立纱线在芯模表面落点的位置方程; 应用模型重构算法, 重构异型构件的变截面、大曲率等表面轮廓特征; 基于轮廓特征对纱线分布进行优化设计, 实现编织速度、牵引速度、牵引轨迹等工艺参数推理。结果表明: 该工艺推理方法使芯模内外侧覆盖率差值降低了68.9%, 显著提升了编织异型预成型体的一致性。

关键词: 编织工艺; 复合材料; 工艺推理; 纤维增强体; 偏心理论

中图分类号: TB332; TS184.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)02-0001-07

Braiding process reasoning method for special-shaped components based on off-center theory

CUI Bo^{1,2}, YANG Haitang³, LI Qiyang⁴, YU Jianyong¹

(1. Innovation Center for Textile Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. College of Physics, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610073, China; 4. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to realize accurate and autonomous production of braided preforms for special-shaped composite components, a process reasoning method for braiding special-shaped components based on the off-center theory is proposed. The off-center braiding parameters are proposed and the yarn deposition pattern under the off-center braiding is analyzed. The position equation of the yarn falling point on the surface of the mandrel is established based on the response function of the convergence length over time. The surface contour features such as variable cross-section, large curvature of the profiled member are reconstructed by applying the model reconstruction algorithm. The optimized design of the yarn distribution is carried out based on the contour features, and the reasoning for the process parameters such as the braiding speed, the take-up speed, and the trajectory are realized. The results show that the process reasoning method reduces the coverage difference between the inner and outer sides of the mandrel by 68.9%, and significantly improves the consistency of braided special-shaped preforms.

Key words: braiding process; composite materials; process reasoning; fiber reinforcement; off-center theory

编织技术可以根据芯模形状织造出具有特定几何特征的多层整体网状预成型体, 其抗分层能力强、力学性能优异、成形效率高^[1-4], 是复合材料大尺寸异型构件预成型体的最优制造方法之一^[5-8]。

目前, 航空航天领域中大尺寸异型构件如大飞机隔框、地板梁与火箭尾喷管、喉衬等轻量化的需求增加, 亟需使用复合材料代替传统金属材料, 以低成本快速制造异型构件^[9]。因此, 针对异型构件的编织精确

收稿日期: 2024-12-11

基金项目: 工业和信息化部项目(2023ZY01060-6); “纺织之光”应用基础研究项目(J202202); 江苏省重点研发计划项目(BE2023070)

第一作者: 崔博(1986—), 男, 博士, 实验师, 主要研究方向为三维编织复合材料制备。E-mail: cuibo@dhu.edu.cn

通信作者: 俞建勇(1964—), 男, 博士, 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为纺织材料、复合材料。E-mail: yujy@dhu.edu.cn

成形技术成为当前的研究热点^[10-12]。对异型构件的牵引轨迹、牵引速度、编织速度等编织工艺参数进行精准推理是实现低成本快速制造的关键技术之一。

针对具有大曲率、变截面等几何特征的异型构件，多数研究者使用解析法推理编织工艺参数。Du 等^[13]对变截面芯模的编织工艺进行了详细的解析法建模，构建编织速度、牵引速度、芯模形状与织物结构之间的非线性关系，利用几何微元法对芯模进行离散化建模，利用纱线的空间分布方程推理编织速度、牵引速度等编织工艺参数。Gondran 等^[14]提出了一种基于编织角的工艺参数逆向求解算法，利用离散圆柱体拟合异型结构芯模并应用解析法计算初始编织工艺参数，同时使用编织过程的状态数据实时修正工艺参数。Kyosev 等^[15]利用图像处理技术与解析法相结合，开发圆截面芯模织物结构正向预测与工艺参数逆向推理软件。李麒阳等^[16]对大尺寸异型构件的编织工艺进行深入分析，通过修正编织过程收敛长度优化编织角，实现大尺寸异型构件预成型体的精确编织。

然而，在传统的对心垂直编织工艺下，芯模复杂几何特征处易出现织物堆叠、稀疏等织物缺陷问题^[17-19]。Li 等^[20]提出一种基于芯模轮廓的偏心编织工艺，通过偏心编织实现纱线在芯模周向的优化分布，大幅度消除织物缺陷，但没有提出偏心编织下工艺参数的推理方法。使用传统解析法推理偏心编织中的编织工艺参数时，难以通过给定几何约束建立工艺与织物结构之间的映射关系。部分研究者提出采用运动学方法对复杂的异型构件的工艺参数进行推理。Ravenhorst 等^[21]提出基于纱线沉积模型的工艺参数推理方法，通过运动学方法快速计算锭子的最优运动轨迹，进而推理出牵引速度、牵引轨迹。Monnot 等^[22]对 Ravenhorst 提出的方法进行优化，适用于结构更加复杂的异型构件，并在飞机隔框上进行了编织实验验证。但是上述方法均以编织角为单一目标进行工艺参数推理，无法解决异型构件中的织物缺陷问题。因此，为实现异型构件的精确成形和制造，亟需一种可消除织物缺陷的高质量编织工艺参数推理方法。

本文提出了一种基于偏心理论的异型构件编织工艺推理方法，分析芯模在偏心情况下的织物分布规律，明晰偏心编织的纱线沉积机理，对异型构件芯模进行表面网格重构，自适应优化期望织物轨迹分布，基于运动学对编织参数进行推理，得到与芯模中心线不一致的偏心编织轨迹。该方法适用于异型构件，解决使用传统方法推理出的工艺参数进行编织存在的织物缺陷问题。

1 偏心编织数学模型

异型构件的编织过程如图 1 所示。工艺参数中的编织速度由编织机主驱动系统控制，牵引速度与牵引轨迹由编织姿态调节系统控制。主驱动系统使顺时针锭子与逆时针锭子带动纱线进行高速交错运动，同时编织姿态调节系统中的机器人夹持芯模以不同的姿态持续推进。

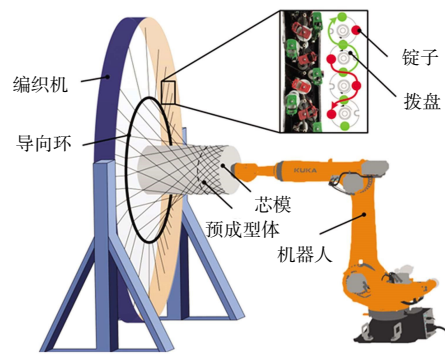


图 1 编织机主要组成部分

Fig.1 Main components of braiding machine

传统对心垂直编织工艺与偏心编织工艺的理论模型对比如图 2 所示。在不同编织工艺下纱线的沉积形式不同。本文首先通过解析法建立纱线与芯模的几何关系方程，基于运动学法将几何关系映射在三维空间中进行纱线落点分析。

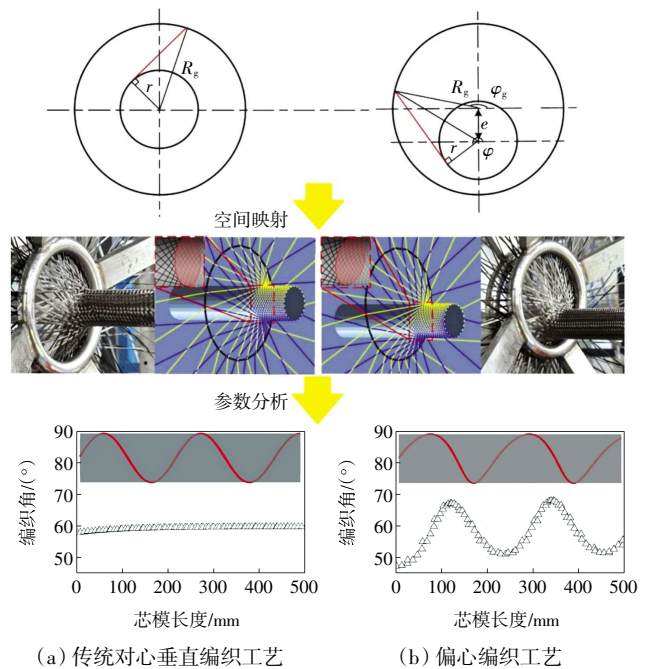


图 2 编织模型对比

Fig.2 Comparison of braiding models

对心垂直编织过程中，纱线落点与芯模外轮廓相

切,纱线落点可以通过数学公式描述,关系式为^[23]:

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{R_g^2 - r^2}}{H} \quad (1)$$

$$H(t) = \left(H_0 - \frac{V\sqrt{R_g^2 - r^2}}{\omega r} \right) e^{\left(\frac{\omega t}{\sqrt{R_g^2 - r^2}} \right)} + \frac{V\sqrt{R_g^2 - r^2}}{\omega r} \quad (2)$$

式中: V 为牵引速度; ω 为纱线的编织速度; R_g 为导向环半径; r 为芯模半径; H 为收敛长度; H_0 为初始收敛长度; α 为编织角; t 为编织时间。由图2可以看出,在对心垂直编织过程中,纱线在芯模环向的编织速度相同。因此,预成型体在任意位置的结构相同,从式(1)与式(2)中可以看出,当 H_0 选择恰当时,编织过程中编织角大小仅与纱线的编织速度和牵引速度有关。

在偏心编织条件下,由于存在偏心值 e ,导致锭子速度映射在芯模表面后,锭子速度与纱线的编织速度不一致,且随落点位置变化而变化。针对纱线在导向环上的位置与纱线在芯模上的落点位置建立空间关系方程,形式如下:

$$\varphi_g = \begin{cases} \varphi + \arccos\left(\frac{e \sin \varphi + r}{R_g}\right) & \text{顺时针纱线} \\ \varphi - \arccos\left(\frac{e \sin \varphi + r}{R_g}\right) & \text{逆时针纱线} \end{cases} \quad (3)$$

式中: φ 为纱线落点在芯模截面坐标系下的角度; φ_g 为纱线与导向环的交点在导向环坐标系下的角度。为获得偏心编织下锭子速度映射在芯模表面的编织速度,对式(3)计算关于时间的微分,表达形式如下:

$$\omega_b = \frac{d\varphi}{dt} = \begin{cases} \frac{\omega \sqrt{R_g^2 - (e \sin \varphi + r)^2}}{\sqrt{R_g^2 - (e \sin \varphi + r)^2} - e \cos \varphi} & \text{顺时针纱线} \\ \frac{\omega \sqrt{R_g^2 - (e \sin \varphi + r)^2}}{\sqrt{R_g^2 - (e \sin \varphi + r)^2} + e \cos \varphi} & \text{逆时针纱线} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_b 为锭子速度映射在芯模表面的编织速度。因此,偏心情况下纱线落点的表达式为:

$$H(t) = e^{-\int \frac{\omega_b(t)r}{\sqrt{(e - R_g \sin \varphi_s)^2 + (R_g \cos \varphi_s)^2 - r^2}} dt} \left(\int V e^{-\int \frac{\omega_b(t)r}{\sqrt{(e - R_g \sin \varphi_s)^2 + (R_g \cos \varphi_s)^2 - r^2}} dt} dt + C \right) \quad (5)$$

根据式(1)~式(5)建立偏心编织运动学模型,通过空间几何关系对编织速度、牵引速度、偏心值等参数的耦合关系建模。可以发现:在对心垂直编织模型

中,收敛长度为垂直于导向环的平面,稳定的纱线落点空间位置带来了稳定的编织角;然而,在偏心编织模型中,收敛平面与导向环平面呈现一定角度,导致纱线在成形过程中的收敛长度发生变化,通过动态变化的编织角实现变角度编织。

基于上述理论分析可知,对心垂直编织工艺与偏心编织工艺的主要区别在于相同的锭子运动速度在2种工艺下获得不同的编织速度,造成在芯模表面形成不同的编织角与纱线间距。对于异型结构芯模而言,其曲率内侧与曲率外侧因几何特征差异,致使表面积并不相同,在此情形下,若采用相同的织物结构,会造成外侧织物稀疏、内侧织物堆叠的现象。在与对心垂直编织相同的编织速度与牵引速度下,偏心编织工艺能够改变偏心两侧的织物结构。因此,本文对异型构件的偏心编织工艺参数进行推理,生成偏心牵引轨迹与偏心牵引速度,实现高质量编织成形。

2 偏心编织工艺推理方法

由偏心理论可知,对于异型构件设计合适的偏心值可以消除编织过程造成的织物缺陷。然而,若偏心值设计不恰当,则会导致预成型体中的纱线分布更加不均匀,甚至造成织物多层堆叠。本文设计的偏心编织工艺推理框架如图3所示。

首先,对芯模三维模型进行表面数据的提取与处理。由于设计的原因,大部分芯模的三维模型中存在穿孔、凹台等编织冗余特征,造成芯模表面点位分布不均匀,不均匀的表面网格分布会影响全域纤维束分布优化。因此,本文使用Li等^[24]提出的模型重构算法对芯模表面网格进行二次处理。对芯模三维模型中的所有点云数据进行正交投影,获得异型构件的中心线,利用中心线与点云数据的空间关系重新构建芯模的关键截面,通过自定义调用序列连接关键截面点位,生成均匀化表面网格。在重构后的网格表面生成编织角矢量场,每个网格中矢量场的表达式为:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_n^c = \text{Rot}(\mathbf{f}_n, \alpha_s) \mathbf{t}_n & \text{顺时针纱线} \\ \mathbf{F}_n^{cc} = \text{Rot}(\mathbf{f}_n, \alpha_s) \mathbf{t}_n & \text{逆时针纱线} \end{cases} \quad (6)$$

式中: \mathbf{F}_n 表示第 n 个三角面片上的编织角方向矢量; c 代表顺时针纱线; cc 代表逆时针纱线; \mathbf{t}_n 代表第 n 个三角面片上中心线的投影向量,本文定义中心线上与该面片中心点距离最短的离散点方向为该面片对应的切线方向; \mathbf{f}_n 为第 n 个三角面片的法向量; α_s 为该面片对应的期望编织角; Rot 为广义旋转矩阵,表达式为:

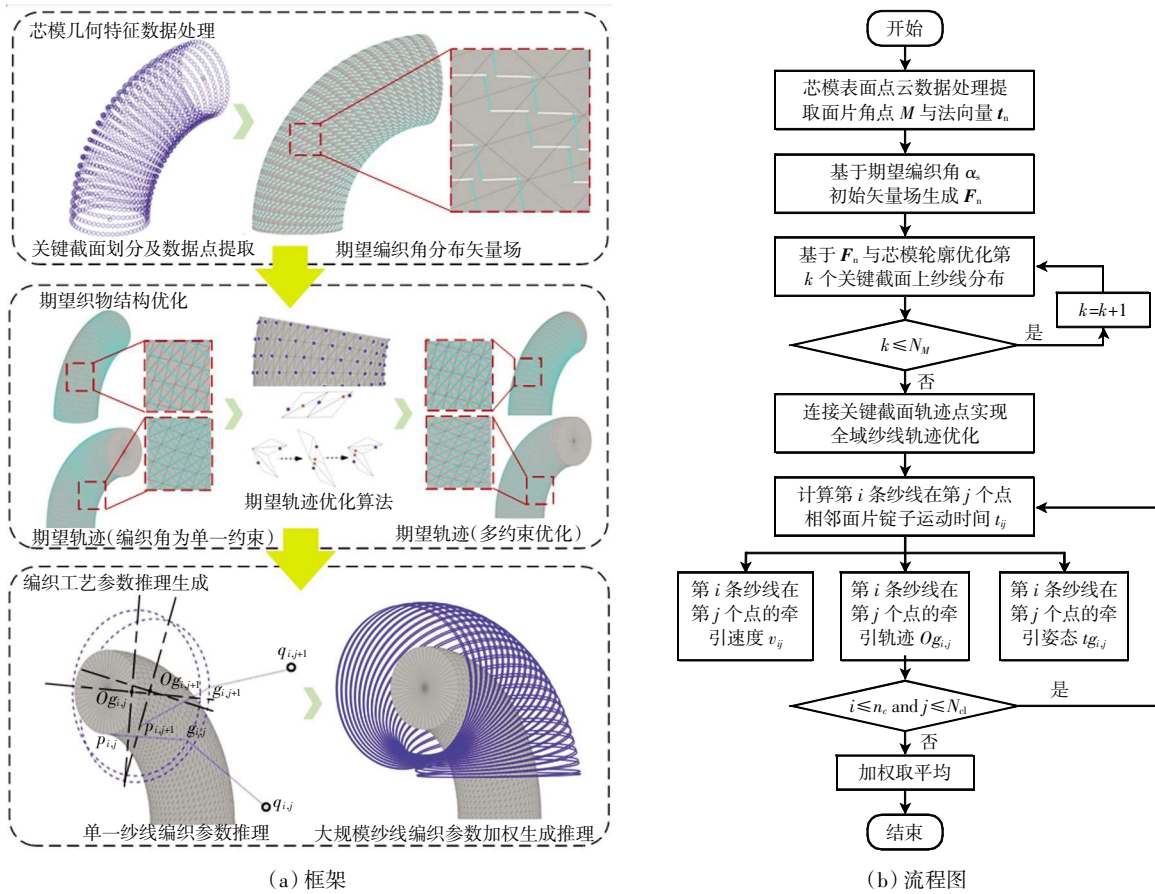


图 3 偏心编织工艺参数推理框架
Fig.3 Reasoning frame of parameters in off-center braiding process

$$\text{Rot}(f_n, \alpha_n) = \begin{bmatrix} f_x^2 \text{vers } \alpha_n + c\alpha_n & f_x f_y \text{vers } \alpha_n - f_z c\alpha_n & f_x f_z \text{vers } \alpha_n + f_y s\alpha_n & 0 \\ f_x f_y \text{vers } \alpha_n + f_z s\alpha_n & f_y^2 \text{vers } \alpha_n + c\alpha_n & f_z f_y \text{vers } \alpha_n - f_x s\alpha_n & 0 \\ f_x f_z \text{vers } \alpha_n - f_y c\alpha_n & f_z f_y \text{vers } \alpha_n + f_x s\alpha_n & f_z^2 \text{vers } \alpha_n + c\alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其次,以期望编织角作为约束条件,以芯模 N_M 个关键截面上的轨迹均匀分布作为优化目标,对期望织物结构进行设计,见图 3。基于面片上的编织角矢量场分别生成顺时针纱线与逆时针纱线的编织角基准线,采用该基准线保证优化后的纱线轨迹在期望编织角附近波动,以免造成性能差异。提取基准线与重构模型关键平面的交点作为基准点,以基准点位置与所在关键截面周长为条件,对关键截面的边线进行重新划分,消除在曲率内侧与曲率外侧纱线间距分布不均匀的现象。

最后,建立优化后的期望织物结构与编织工艺参数之间的关系,对偏心编织工艺参数进行推理生成。由于编织工艺参数中的牵引轨迹与牵引速度均为单一控制量,然而期望织物结构中的每一条纱线均对应

一条轨迹与速度曲线,因此本文基于中心线上的离散点对所有轨迹与速度进行加权求和计算,获得工艺参数推理。对 N_c 个离散点 C_j 对应的所有面片上的期望轨迹分别求解其映射在锭子运动空间的位置 $q_{i,j}$,如图 3 所示。针对面片上的纱线轨迹,沿其优化后的期望织物方向延长,与导向环的交点为 $g_{i,j}$ 且形成导向环的中点位置 $Og_{i,j}$,与锭子运动平面的交点为 $q_{i,j}$ 。基于同一条轨迹在相邻面片上沉积所需要的时间 t_{ij} 、导向环位置及姿态求解每条纱线的牵引速度。对所有纱线对应的速度、轨迹、姿态加权取平均,得到偏心编织下的编织工艺参数,表达式为:

$$V_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} v_{i,j}^c w_{i,j}^c + \sum_{i=1}^{n_c} v_{i,j}^{cc} w_{i,j}^{cc}}{2n_c} \quad (8)$$

$$Cg_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} Og_{i,j}^c w_{i,j}^c + \sum_{i=1}^{n_c} Og_{i,j}^{cc} w_{i,j}^{cc}}{2n_c} \quad (9)$$

$$Tg_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} t g_{i,j}^c w_{i,j}^c + \sum_{i=1}^{n_c} t g_{i,j}^{cc} w_{i,j}^{cc}}{2n_c} \quad (10)$$

式中: $v_{i,j}$ 为纱线对应的牵引速度; $w_{i,j}$ 为纱线对应的权重值; $Og_{i,j}$ 为导向环中心点位置; $tg_{i,j}$ 为导向环法向量; V_j 为偏心编织工艺下的牵引速度; Cg_j 为偏心编织工艺下的编织轨迹位置; Tg_j 为偏心编织工艺下的编织轨迹姿态。

3 实验验证

3.1 编织试验

为验证本研究所提出偏心编织工艺推理方法的有效性,本文采用传统解析法与偏心工艺推理法生成的工艺参数进行编织对比实验。实验采用云路复材的编织成套装备进行,其中包括 176 锭编织机及一台配备线性导轨的 KUKA 机器人组成的编织姿态调节系统。实验中所编织的大曲率异型构件的几何形状如图 4 所示,上半段为编织成形段,下半段为方便夹持所设计的辅助延长段,不进行编织作业。采用中复神鹰 12K T700 未加捻的碳纤维纱线进行编织,编织装备参数如表 1 所示。

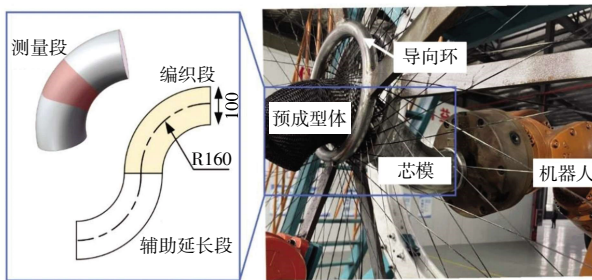


图 4 编织实验示意

Fig.4 Schematic diagram of braiding experiment

表 1 编织装备参数

Tab.1 Parameters of braiding equipment

锭子数量	锭子运动速度 ω / ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	期望编织角 α_j / ($^\circ$)	导向环半径 R_g / mm	底盘半径 R_q / mm
176	0.133 2	60	100	1 821

3.2 牵引轨迹及牵引速度对比

利用 2 种方法求解得到的牵引轨迹与牵引速度如图 5 所示。由图 5 可以看出,传统对心垂直工艺下牵引轨迹与芯模中心线几乎一致,由于收敛长度的存在导致轨迹略长于芯模中心线。偏心编织工艺为了优化预成型体中的局部织物结构,牵引轨迹与芯模中心线存在较大的差异,整体轨迹向上偏移 38 mm。同时,在编织前半段编织速率较快,加快纱线从初始状态到沉积状态的过程,后半段逐渐稳定在 4 mm/s,与传统解析法所获得的速率一致。

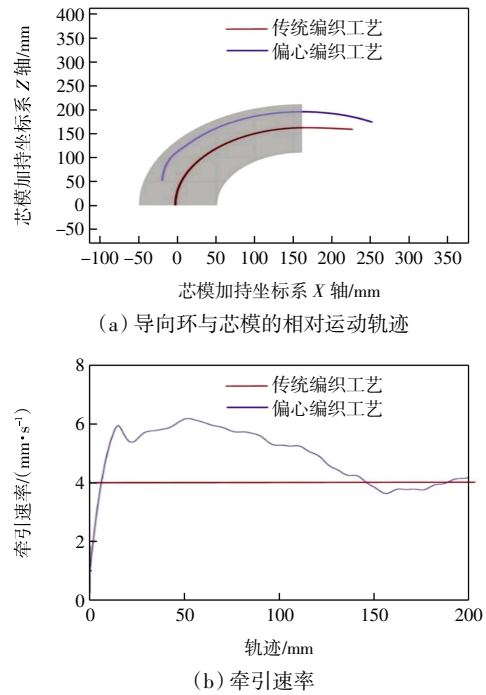


图 5 不同编织工艺的牵引轨迹与牵引速率对比

Fig.5 Comparison of traction trajectory and traction rate for different braiding processes

3.3 沉积点位置及收敛长度对比

在模型中提取不同时刻所有纱线的沉积点位置及收敛长度,如图 6 所示。

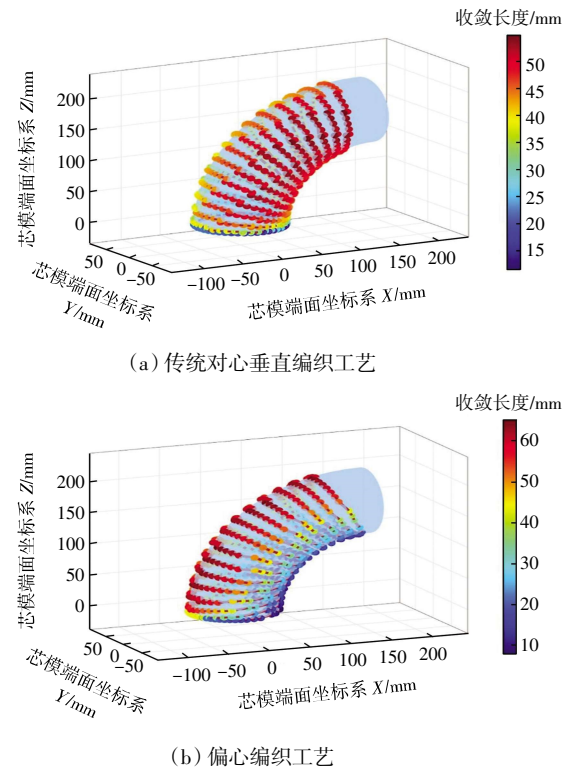


图 6 不同编织工艺收敛长度对比

Fig.6 Comparison of convergence length for different braiding processes

不同的沉积速度会导致不同的编织收敛长度。对于环状落点,不同的收敛长度会导致纤维束在芯模不同区域的分布不同。由图6可以看出,偏离中心一侧的收敛长度缩短,显示出偏离中心一侧编织角增大的现象,同时逐渐缩短的收敛长度带来了沉积点位置变化速率较快的特性,编织过程中收敛平面与中心线呈现一定角度,改善大曲率结构特征处的纱线间距,优化织物结构。值得注意的是,在偏心的左右两侧,虽然收敛长度相近,但是由于正纤维束和反纤维束的环沉积速度不同且差异较大,导致偏心左右两侧的织物在结构存在上不对称现象。

3.4 编织角与覆盖率对比

织物结构如图7所示,对图4所示芯模上的红色区域进行编织角测量与覆盖率测量对比。

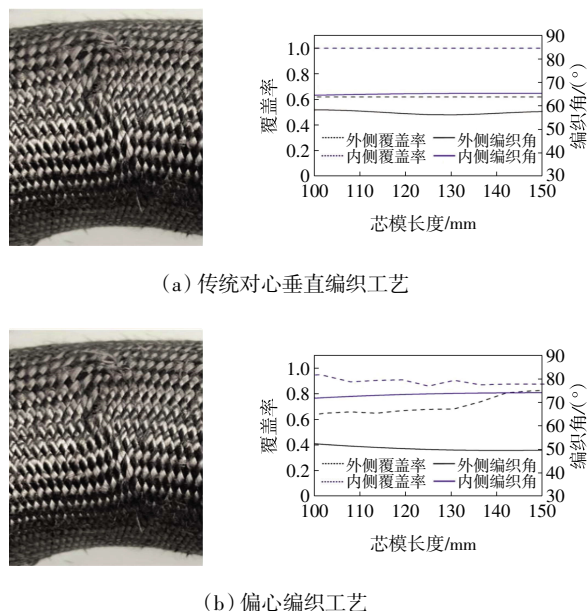


图7 不同编织工艺织物结构对比

Fig.7 Comparison of fabric structure for different braiding processes

由图7可知,传统解析法推理出的对心垂直编织工艺参数基于芯模中心线进行编织,由于本文异型构件为大曲率弯管,芯模环向纱线的沉积量相同导致在芯模曲率内侧区域与曲率外侧区域上表现出异常的织物结构。在曲率内侧,由于表面积较小,织物出现挤压堆叠现象;在曲率外侧,由于表面积较大,纱线不足以覆盖满芯模,出现织物空洞。在对心垂直工艺下,内外侧编织角在 55° ~ 65° 区间内变化,与期望编织角 60° 较为接近,然而覆盖率表现出明显的差异,差值在0.35以上。而偏心编织的织物内外侧覆盖率得到显著改善,无织物堆叠与稀疏现象,内外侧覆盖率的平均

差值为0.11,与传统方法相比降低了68.9%以上。但由于沉积机理下织物非均匀环向沉积,编织角在曲率内侧与外侧精度出现一定程度的降低,与期望编织角的差值最大出现在曲率外侧。

4 结论

(1) 针对编织异型构件易出现织物缺陷的问题,提出了一种基于偏心机理的编织工艺参数推理方法。通过分析偏心工艺对异型构件织物成形的影响机理,基于网格重构模型对异型构件上的表面网格进行均匀化排布,提出编织角方向矢量优化方法,逆向推理偏心编织工艺下的编织轨迹与速度。

(2) 基于偏心机理的编织工艺推理方法是一种不同于传统解析法的新型推理手段,适用于异型构件芯模,提高预成型体编织质量。实验结果表明,该方法推理生成的工艺参数可以完全消除异型构件复杂几何特征处的织物缺陷,内外侧覆盖率的平均差值比传统方法降低了68.9%以上,突破了传统编织工艺的编织位姿约束,为大尺寸异型构件低成本快速自动化编织生产线的工艺规划软件提供了理论基础。

参考文献:

- [1] ZHAO Z Q, DANG H Y, LIU P, et al. On the impact failure behavior of triaxially braided composites subjected to metallic plate projectile[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 186: 107816.
- [2] WU Z Y, ZHANG L C, YING Z P, et al. Low-velocity impact performance of hybrid 3D carbon/glass woven orthogonal composite: Experiment and simulation[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 196: 108098.
- [3] TANG E L, ZHANG W, WANG X X, et al. Macroscopic and mesoscopic simulation of damage behavior for CF/BMI laminates induced by rectangular cross-sectional TC4 flyer high-speed impact[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 198: 111675.
- [4] ZHANG C, MIN L J, CURIEL-SOSA J L, et al. Ballistic performance and damage behavior of three-dimensional angle-interlock woven composites under high velocity impact: Experimental and numerical studies[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 191: 111056.
- [5] LIU Y, SHAN Z D, LIU F, et al. Optimization control of guide bar array deformation in flexible-oriented 3D woven process[J]. Polymer Composites, 2024, 45(6): 5386-5398.
- [6] CHEN X M, ZHANG Y F, XIE J B, et al. Robot needle-punching path planning for complex surface preforms[J]. Robotics

- and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 52: 24-34.
- [7] ZHANG W X, LIU F, LV Y X, et al. Design and analysis of a metamorphic mechanism for automated fibre placement[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 130: 463-476.
- [8] LIAN K P, YANG L, ZHU D Y, et al. Effect of printing parameters on 3D-printed carbon fiber-reinforced polymer composites under magnetic field control[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 101: 1443-1452.
- [9] LI Q Y, JI C C, LI S Y, et al. Predicting the topology of braided structures in arbitrarily composite preforms based on yarn interactions[J]. Textile Research Journal, 2024, 94(19/20): 2201-2219.
- [10] HU M Q, SUN B Z, GU B H. Microstructure modeling multiple transverse impact damages of 3-D braided composite based on thermo-mechanical coupling approach[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 214: 108741.
- [11] LIU S K, WANG L Y, SIDDIQUE A, et al. Irradiation multi-scale damage and interface effects of 3D braided carbon fiber/epoxy composites subjected to high dose γ -rays[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 281: 111575.
- [12] CAI Y L, ZHAO Z Q, LIU P, et al. Revealing the failure mechanism of 2D triaxially braided composites under off-axial tension through mesoscale simulations[J]. Composites Science and Technology, 2024, 257: 110838.
- [13] DU G W, POPPER P. Analysis of a circular braiding process for complex shapes[J]. The Journal of the Textile Institute, 1994, 85(3): 316-337.
- [14] GONDRAN M, ABDIN Y, GENDREAU Y, et al. Automated braiding of non-axisymmetric structures using an iterative inverse solution with angle control[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 143: 106288.
- [15] KYOSEV Y, AURICH M. Investigations about the braiding angle and the cover factor of the braided fabrics using image processing and symbolic math toolbox of matlab[M]//Advances in Braiding Technology. [s.n.]: Elsevier, 2016: 549-69.
- [16] 李麒阳, 季诚昌, 郗欣甫, 等. 大尺寸异形结构芯模编织策略及纱线轨迹预测[J]. 纺织学报, 2023, 44(10): 188-195.
LI Q Y, JI C C, XI X F, et al. Braiding strategy and yarn trajectory prediction of large size special-shaped structure mandrel[J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(10): 188-195 (in Chinese).
- [17] FOULADI A, JAFARI NEDOUSHAN R. Prediction and optimization of yarn path in braiding of mandrels with flat faces[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(5): 581-592.
- [18] FOULADI A, JAFARI NEDOUSHAN R, HAJRASOULIHA J, et al. Control of braid pattern on every side of a braided composite part produced by asymmetrical braiding process[J]. Applied Composite Materials, 2019, 26(2): 479-492.
- [19] KESSELS J F A, AKKERMAN R. Prediction of the yarn trajectories on complex braided preforms[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(8): 1073-1081.
- [20] LI Q Y, CHI X F, JI C C, et al. Off-center braiding process for complex composite preforms based on analysis of the geometric contour model of the mandrel[J]. Textile Research Journal, 2022, 92(23/24): 4845-4859.
- [21] VAN RAVENHORST J H, AKKERMAN R. Circular braiding take-up speed generation using inverse kinematics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 64: 147-158.
- [22] MONNOT P, LÉVESQUE J, LABERGE LEBEL L. Automated braiding of a complex aircraft fuselage frame using a non-circular braiding model[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 102: 48-63.
- [23] 王晓明, 邹婷, 李超婧, 等. 基于编织点起始位置及牵拉速度变化的编织角预测模型[J]. 纺织学报, 2015, 36(9): 28-33.
WANG X M, ZOU T, LI C J, et al. Predicting model for braiding angle based on initial braiding height and take-up speed[J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(9): 28-33 (in Chinese).
- [24] LI C E, LI Q Y, CHI X F, et al. Design of fast braiding process based on reconstructing mesh with complex and irregular mandrels[J]. Textile Research Journal, 2024, 94(13/14): 1527-1542.

本文引文格式:

崔博, 阳海棠, 李麒阳, 等. 基于偏心理论的异型构件编织工艺推理方法[J]. 天津工业大学学报, 2025, 44(2): 1-7.

CUI B, YANG H T, LI Q Y, et al. Braiding process reasoning method for special-shaped components based on off-center theory[J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(2): 1-7 (in Chinese).