

引文格式: 崔灿, 樊臻, 张森林. 考虑碳纤维纱线摩擦的编织复合材料制备卷取速度反解算[J]. 航空制造技术, 2025, 68(10): 98–106.
CUI Can, FAN Zhen, ZHANG Senlin. Inverse solution algorithm for take-up speed in preparation of braided reinforced composites considering carbon fiber yarn friction[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(10): 98–106.

考虑碳纤维纱线摩擦的编织复合材料制备卷取速度反解算法*

崔 灿¹, 樊 臻^{1,2}, 张森林^{1,2}

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027;

2. 浙江大学金华研究院, 金华 321032)

[摘要] 碳纤维纱线环形编织作为一种用于生产管状预成型件的复合材料制造工艺, 广泛应用于航空航天等工业领域。在生产前, 须依据预期编织角反解出芯轴卷取速度。然而, 仅基于传统运动学的反解方法误差较大。为解决此问题, 本文提出考虑纱线摩擦的环形编织芯轴卷取速度反解算法, 该算法通过对会聚区内纱线间相互作用进行力学分析, 依据预期编织角求出理想运动学模型下的等效编织角; 再通过对环形编织过程的运动学分析, 根据等效编织角得出相应的芯轴卷取速度。通过有限元仿真试验与实物试验验证了算法的有效性, 结果表明, 相较于传统仅基于运动学分析的反解方法, 本文算法有效反映了编织过程中纱线间相互作用的影响。依据本文算法解出的卷取速度进行环形编织仿真与实物试验, 所得编织角与预期编织角的平均误差在整个编织过程中可控制在 1° 以内, 相比传统运动学方法显著减小。

关键词: 碳纤维; 编织增强复合材料; 环形编织; 自动化; 智能制造

中图分类号: V26; TB33 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.10.098

Inverse Solution Algorithm for Take-Up Speed in Preparation of Braided Reinforced Composites Considering Carbon Fiber Yarn Friction

CUI Can¹, FAN Zhen^{1,2}, ZHANG Senlin^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Jinhua Institute, Zhejiang University, Jinhua 321032, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber yarn circular braiding is a composite manufacturing process for producing tubular preforms, widely applied in industrial fields such as aerospace. Before circular braiding, it is essential to inversely calculate the take-up speed of the mandrel based on the expected braid angle of the braided composite. However, the traditional inverse-solution method relying solely on kinematics has a large error. To address this issue, this paper proposes an inverse-solution algorithm for the mandrel take-up speed in circular braiding that incorporates yarn friction. Firstly, through the mechanical analysis of the interaction between yarns in the convergence zone, the equivalent braid angle under the ideal kinematic model was calculated according to the expected braid angle. Then, by conducting a kinematic analysis of the circular braiding process, the corresponding mandrel take-up speed was obtained based on the equivalent braid angle. To verify the effectiveness of the inverse-solution algorithm, a circular-braiding finite element simulation model and a circular-braiding physical experimental platform were established for simulation and physical experiments. The experimental results indicate that, compared with the traditional inverse-solution method based only on kinematics analysis, the proposed algorithm can

* 基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C01237)。

effectively reflect the influence of the interaction between yarns during the braiding process. The average error between the obtained braid angle and the expected braid angle is less than 1° , which is significantly reduced compared to traditional kinematic methods.

Keywords: Carbon fiber; Braided reinforced composite; Circular braiding; Automation; Intelligent manufacturing

环形编织是一种用于生产管状预成型件的复合材料制造工艺,由环形编织机在芯轴表面交织沉积碳纤维纱线,得到编织增强体,再使用树脂等进行浸渍和固化,然后移除芯轴,制得编织增强复合材料。编织增强复合材料具有轻质、高强度等优点,比传统的复合材料具有更强的抗冲击损伤特性^[1]。因此,近年来基于环形编织生产的编织增强复合材料在航空航天、医疗设备、汽车制造等领域取得了广泛应用。进行环形编织前,需要根据所生产的复合材料编织件的预期编织角确定芯轴的卷取速度。在传统生产过程中,芯轴卷取速度的确定依赖于长期积累的生产经验及正式生产前的多次试错,消耗时间及材料。同时,近年来复合材料编织件在外观形态、性能指标上呈现出多样化、复杂化的趋势,传统方法已难以满足实际生产在效率和精度上的要求。为了解决上述问题,亟须构建一种高效、准确、适用性强的编织增强复合材料的环形编织反解算法。

国内外学者针对环形编织进行了部分研究。舒展翔^[2]将复杂的编织机部件和运动状态简化为数学模型,首先在有限元的离散化思想和迭代法的思想基础上提出了丝束轨迹预测算法,可用于任意等截面芯轴的丝束轨迹预测。随后,基于有限元和二分法的思想,结合轨迹预测算法,得到了对应编织角变化的速度曲线反解算法。然而,该算法仅基于运动学模型构建,在算法准确度上存在局限。荷兰学者 Van Ravenhorst 等^[3]提出了一种基于几何分析的方法,用于对具有任意截面的芯轴进行卷取速度反解,但试验结果显示,采用该方法解得的卷取速度进行编织时,得到的实际编织角与预期编织角相比,最大误差可达 10° 。后续研究中,研究人员对芯轴表面进行三角形逼近,通过环形编织机线轴回转和芯轴抽取的运动同步关系,发展了在三角面元边线上进行序列落点求解的数值方法,以及相应的芯轴卷取速度求解方法,但求解准确度仍然不够理想^[4];通过分析,研究人员认为误差产生的原因是模型中忽略了纱线的相互作用,从而提出了一种纱线接触模型,在生成芯轴卷取速度时考虑纱线接触摩擦的影响,但该算法无法适用于异形芯轴,不具有普适性^[5]。Gondran 等^[6]采用根据运动学正解结果进行反馈校正的方法,成功实现了卷取速度的反解。该方法从近似模型开始迭代计算速度分布,

根据梯度下降法推导出芯轴卷取速度的校正公式,并基于运动学正解结果,以及实际编织后编织角测量的反馈进行校正。在非轴对称、弯曲和可变截面的异形芯轴上,此方法取得了较好的效果。然而该算法的效果完全依赖校正所用的正解算法,不适用于没有实时编织角反馈的工业现场。

现有研究提出的方法无法在考虑纱线接触摩擦这一因素的同时,对具有任意截面的异形芯轴进行卷取速度反解。鉴于此,本文将环形编织过程中会聚区内纱线间的相互作用和纱线在芯轴上沉积的运动学进行分解剖析,以改善环形编织卷取速度反解算法的准确度和适用性,从而提升编织增强复合材料的制备效率。

1 环形编织

1.1 编织过程

环形编织的基本过程如图 1 所示,由机械臂以一定的卷取速度 v 牵引芯轴运动,编织机上的线轴分别对经纱和纬纱进行牵引。经纱与纬纱在导向环的约束下,在芯轴上交织沉积,形成具有一定编织角的编织增强体。其中,经纱和纬纱一端固定于芯轴端面,另一端分别从两组位于编织机“8”字形轨道上的线轴引出。经纱线轴和纬纱线轴在轨道上相间排列,分别以大小相等、方向相反的角速度运动,如图 2 所示。

1.2 相关概念

环形编织过程中,涉及的重要概念及相关物理量包括芯轴半径 r 、芯轴卷取速度 v 、会聚区长度 H 、导向

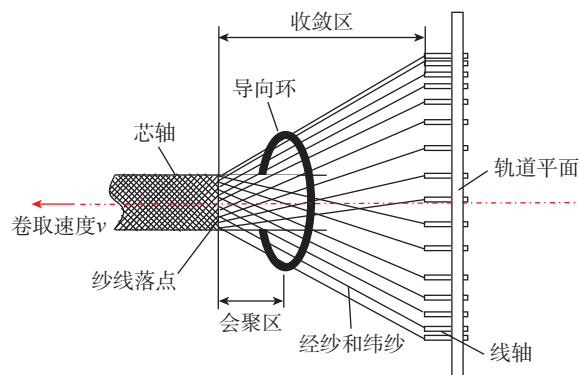


图 1 环形编织过程

Fig.1 Process of the circular braiding

环半径 R 、线轴旋转角速度 ω 、编织增强体编织角 α 等。其中,编织增强体编织角 α 最为关键。如图 3 所示,编织增强体编织角 α 决定了编织增强体的结构,集中反映了最终得到的编织增强复合材料的力学性能,而其他物理量作为参数,在编织过程中影响了编织增强体编织角 α 的大小。实际生产时,单次编织中,导向环半径 R 、线轴旋转角速度 ω 等参数往往是恒定的,根据芯轴的具体形状及编织增强体预期的编织角 α 来确定芯轴卷取速度 v ,这是反解算法所关注和需要解决的重点问题。

2 考虑碳纤维纱线摩擦的卷取速度反解

编织增强复合材料制备过程中,大部分关于卷取速度反解的研究基于一些对碳纤维纱线的假设,包括:纱线在与芯轴发生接触后就不再发生滑移;纱线之间没有相互作用;纱线在会聚区内保持直线状态;忽略纱线厚度等。但 Van Ravenhorst 等^[4]的研究结果表明,这些假设并非完全合适。纱线在与芯轴发生接触后,由于相互交织的互锁作用基本不再发生滑移,但纱线在会聚区内接触引起的相互作用会使纱线无法保持直线状态。如果忽略这一相互作用,仅从运动学角度进行分析,反解出芯轴卷取速度,并使用该速度进行编织生产,将导致实际得到的编织增强体测量编织角与预期值存在较大差距。为改善这一问题,本文首先通过对会聚区内纱

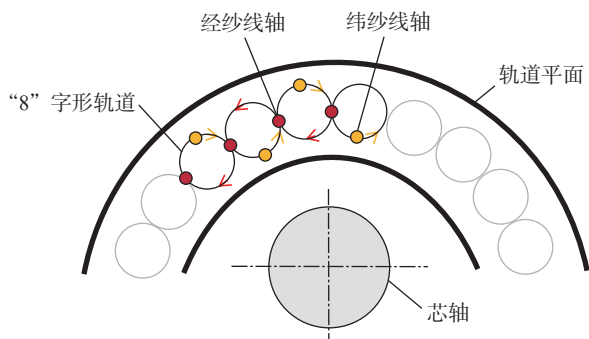


图2 碳纤维纱线线轴运动
Fig.2 Movement of carbon fiber yarn spool

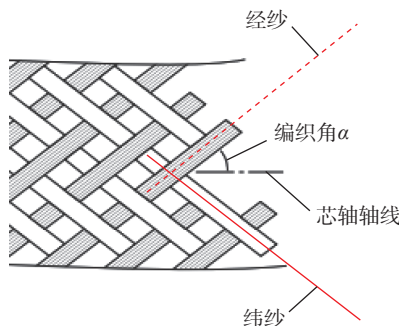


图3 编织增强复合材料的编织角
Fig.3 Braid angle of braided reinforced composites

线间相互作用展开力学分析,根据预期的编织角,求出理想运动学模型下的等效编织角,再通过对环形编织过程的运动学进行分析,根据等效编织角进行反解,从而在考虑到会聚区内纱线间相互作用的情况下求解卷取速度。

2.1 初始化处理

将一个任意截面芯轴在轴向上按一定步长分割,划分为若干个饼状芯轴单元。再将每个饼状芯轴单元在旋转方向上按截面顶点(若为曲面则用多边形逼近)分割为与截面顶点数相同的矩形面。

由于线轴在轨道上的运动,与纱线、导向环接触点的运动保持同步,因此在分析过程中,可用纱线与导向环接触点的运动代替线轴的运动。编织开始时,设置 $2m$ 根纱线(经纱、纬纱各 m 根)相应线轴的位置,从而确定相应的 $2m$ 个与导向环的初始接触点 Q_1 。纱线另一端固定在芯轴的起始端面上,即首个饼状芯轴单元的起始端面上,从而确定 $2m$ 个纱线初始落点 P_1 ,如图 4 所示。

2.2 基于碳纤维纱线相互作用确定等效编织角

根据过往研究^[7],碳纤维纱线在会聚区的相互作用主要会产生以下两方面影响:

- (1) 实际编织时,会聚区的长度相比理论模型要更短;
- (2) 实际编织时,纱线在会聚区内不能保持直线状态,而是产生了一定的弯曲偏斜,从而影响编织增强体的编织角。

基于以上两点,用多条线段首尾相连组成的链状模型来表示会聚区的纱线,描述其在相互作用影响下产生

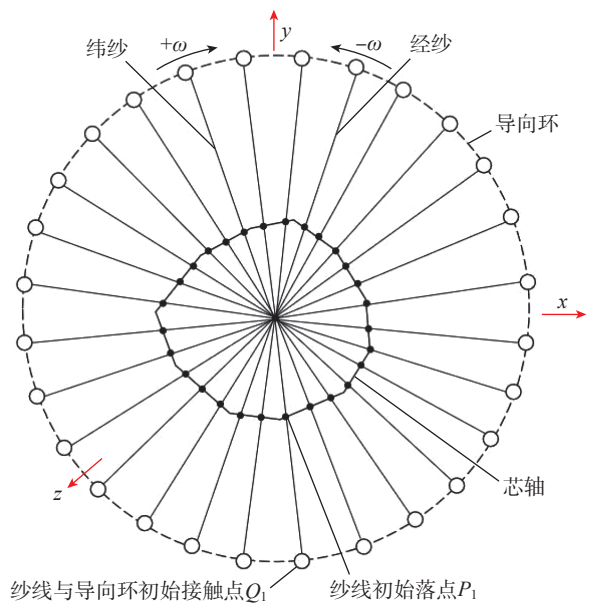


图4 环形编织过程初始化
Fig.4 Initialization of the circular braiding process

偏移弯曲的状态,如图5所示。一般地,以第 k 个饼状芯轴单元的某一根经纱为研究对象,设 Q_k 为经纱与导向环的接触点; P_k 为当前时刻该纱线在芯轴上的实际落点; X_1, X_2, \dots, X_n 为该经纱与发生接触的 n 根纬纱在会聚区的作用点,并根据这 n 个作用点将其划分为由 $n+1$ 个分析单元组成的链状模型。当忽略会聚区内纱线相互作用的影响时,该经纱保持直线状态,即 $P_k'Q_k$, 形成编织角 α' ; 而实际编织时,相互作用使得该纱线在会聚区内产生了一定的弯曲偏斜,即 P_kQ_k , 形成编织角 α 。在已知预期编织角,即已知实际编织角 α 的情况下,从 P_k 到 Q_k 对每个纱线单元进行力学分析,可以累积得到该经纱在会聚区的偏斜角度,进而求出其末端角度 α' 。即,若忽略会聚区内纱线相互作用的影响,织物编织角将由 α 变为 α' 。因此将 α' 定义为在忽略纱线相互作用的理想运动学分析中实际编织角 α 所对应的“等效编织角”。

碳纤维纱线具有高强度、高模量的特点,这意味着因接触而发生相互作用时,碳纤维纱线几乎不会产生轴向形变,而是主要受到纱线间摩擦力的影响。以该段经纱中某一作用点 X_i 为研究对象,首先在垂直于摩擦力 F_i 的平面上进行分析,如图6所示。在考虑碳纤维纱线自身厚度的情况下,由于与纬纱的交织,该经纱在作用点 X_i 处相对于摩擦力 F_i 所在平面产生角度 θ_i ,使得垂直于该平面的法向力 W_i 包括了两侧纱线张力 T 和纱线单元本身重力 G_i 的联合作用,即

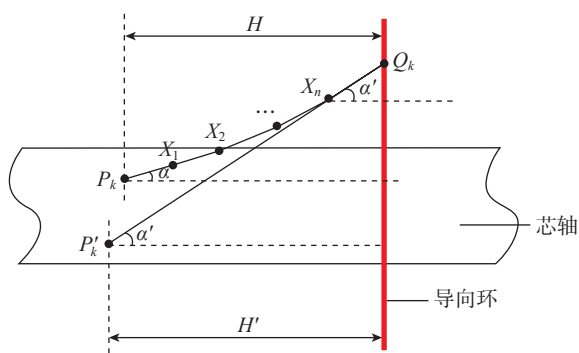


图5 会聚区碳纤维纱线状态
Fig.5 State of carbon fiber yarns in the convergence zone

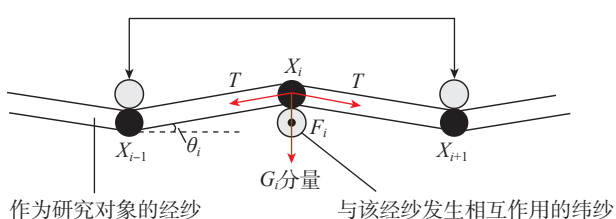


图6 作用点 X_i 受力分析
Fig.6 Force analysis of the interlacement point X_i

$W_i = 2T \sin \theta_i + G_i \cos \beta_i$ (1)
式中, β_i 为该作用点 X_i 在空间内所对应的转角,如图7所示。此处的摩擦力 F_i 由法向力 W_i 通过古典摩擦定律的拓展形式决定^[8],即

$$F_i = aW_i^l \quad (2)$$

式中, a 和 l 都是通过实际测量可以确定的常量。

如图8所示,对摩擦力 F_i 所在的平面上进行分析,其中, γ_i 为该碳纤维纱线单元在局部与芯轴轴向的夹角,称为局部编织角。该纱线单元所属的经纱在以 $-\omega$ 角速度运动的线轴牵引下运动,并在会聚区内与以相反方向运动的纬纱在作用点 X_i 处接触。受到摩擦力 F_i 的影响,该经纱在 X_i 处产生柔性形变,在力的平衡作用下,局部编织角也由 γ_i 变为 γ_i' 。因此,一般地,对于全部 n 个作用点,在作用点 X_i 处相应的关系为

$$\begin{cases} F_{\text{合}\omega} = T_i \sin \gamma_i + F_i \sin \gamma_i - T_i' \sin \gamma_i' \equiv 0, \text{旋转方向} \\ F_{\text{合}z} = T_i \cos \gamma_i - F_i \cos \gamma_i - T_i' \cos \gamma_i' \equiv 0, \text{芯轴轴向} \end{cases} \quad (3)$$

$$T_i = T \cos \theta_i \quad (4)$$

式中, $F_{\text{合}\omega}$ 为作用点 X_i 在线轴旋转方向所受的合力; $F_{\text{合}z}$ 为作用点 X_i 在芯轴轴向所受的合力; T_i' 为纱线在受到摩擦力影响而产生柔性形变之后的张力; T_i 为纱线张力 T 在摩擦力 F_i 所在平面上的分量。进一步由式(3)可

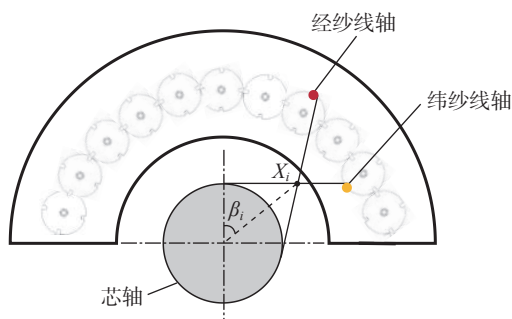


图7 作用点 X_i 空间位置
Fig.7 Spatial position of the interlacement point X_i

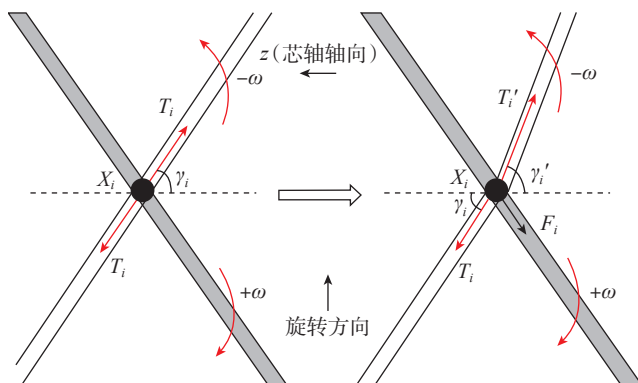


图8 碳纤维纱线单元的局部变形
Fig.8 Local deformation of the carbon fiber yarn unit

推得 γ_i 与 γ'_i 的关系为

$$\tan \gamma_i \frac{T_i + F_i}{T_i - F_i} = \tan \gamma'_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

由式(5)可以得出,只通过初始张力 T_i 及受其影响的摩擦力 F_i 就可以确定 γ_i 的变化。对于任意一根纱线,在其第 i 个作用点 X_i 处求出的形变后局部编织角 γ' ,为第 $i+1$ 个作用点 X_{i+1} 处的形变前局部编织角 γ_{i+1} ,即

$$\gamma_{i+1} = \gamma'_i \quad (6)$$

因此预期编织角 α 等于纱线首端的局部编织角 γ_1 ,等效编织角 α' 等于纱线末端的局部编织角 γ'_n ,由 γ_1 解得 γ'_n 的过程,即由 α 解得 α' 的过程,且在该过程中考虑了该纱线所有作用点处的摩擦作用。求出每根纱线在当前芯轴编织位置的等效编织角后,以其平均值作为芯轴在当前饼状芯轴单元内的最终等效编织角,实现对会聚区内纱线间相互作用的考量。

2.3 由等效编织角求解芯轴卷取速度

等效编织角是实际预期编织角在理想运动学模型下的反映。因此,可在理想运动学模型下,基于等效编织角进行芯轴卷取速度反解。一般地,对每一根纱线,当在第 k 个饼状芯轴单元进行求解时,需要确定其在第 $k+1$ 个饼状芯轴单元的落点 P_{k+1} 和与导向环的接触点 Q_{k+1} ,而初始化时已经定义了 P_1 和 Q_1 ,因此需要导出两项间的推导关系。

如图9所示,纱线在时刻 t_k 和时刻 t_{k+1} ,分别在第 k 个饼状芯轴单元和第 $k+1$ 个饼状芯轴单元开始沉积。纱线与芯轴轴向夹角为等效编织角 α' ,因此可由 P_k 确定 P_{k+1} 。由于芯轴截面为多边形(或用于逼近曲面芯轴的多边形),开始编织之后的纱线实际落点必定位于芯

轴棱线上,即截面顶点上,而 P_{k+1} 大多数情况下并不满足这一条件,因此 P_{k+1} 被认为是时刻 t_{k+1} 时纱线在芯轴单元边界处的虚拟落点。为确定 P_{k+1} 所对应的 Q_{k+1} ,延长 $P_k P_{k+1}$ 至下一芯轴棱线上的 P''_{k+1} 。 P''_{k+1} 为纱线在芯轴该面完全沉积后,在第 $k+1$ 个饼状芯轴单元棱线上的实际落点。同理,在上一个芯轴单元求解的过程中有 P_k'' 。当纱线在芯轴一面沉积完成时,纱线与该面相切,因此可确定两个实际落点 P_k'' 和 P_{k+1}'' 相应的导向环接触点 Q_k'' 和 Q_{k+1}'' 。若假设局部卷取速度恒定,用 φ_k 表示导向环接触点 Q_k 的转角,用 dt_k 表示纱线在第 k 个饼状芯轴单元进行沉积所经历的时间,则存在路径、时间、导向环接触点转角间的等比关系,即

$$\frac{P_k'' P_{k+1}''}{P_{k+1}'' P''_{k+1}} = \frac{\varphi_{k+1} - \varphi_k''}{\varphi''_{k+1} - \varphi_{k+1}} \quad (7)$$

$$\Delta t_k = t_{k+1} - t_k = \frac{\varphi_{k+1} - \varphi_k}{\omega} \quad (8)$$

从而确定 Q_{k+1} 所对应的线轴角度 φ_{k+1} ,并确定 Q_{k+1} 坐标(以导向环中心为原点)为

$$\begin{bmatrix} x_Q^{k+1} \\ y_Q^{k+1} \\ z_Q^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \sin \varphi_{k+1} \\ R \cos \varphi_{k+1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

至此实现了由任意的 P_k 和 Q_k 到 P_{k+1} 和 Q_{k+1} 的推导。

另一方面,在时间 Δt_k 内,纱线开始时刻的落点 P_k 和结束时刻的落点 P_{k+1} 在芯轴轴向(z 方向)上的空间距离已知,设为 Δz_z ,而实际上是由芯轴本身在轴向(z 方向)上的位移 Δz_m 和两落点会聚区长度的变化 Δz_{PQ} 组成的,即存在以下关系:

$$\Delta z_t = \Delta z_m - \Delta z_{PQ} \quad (10)$$

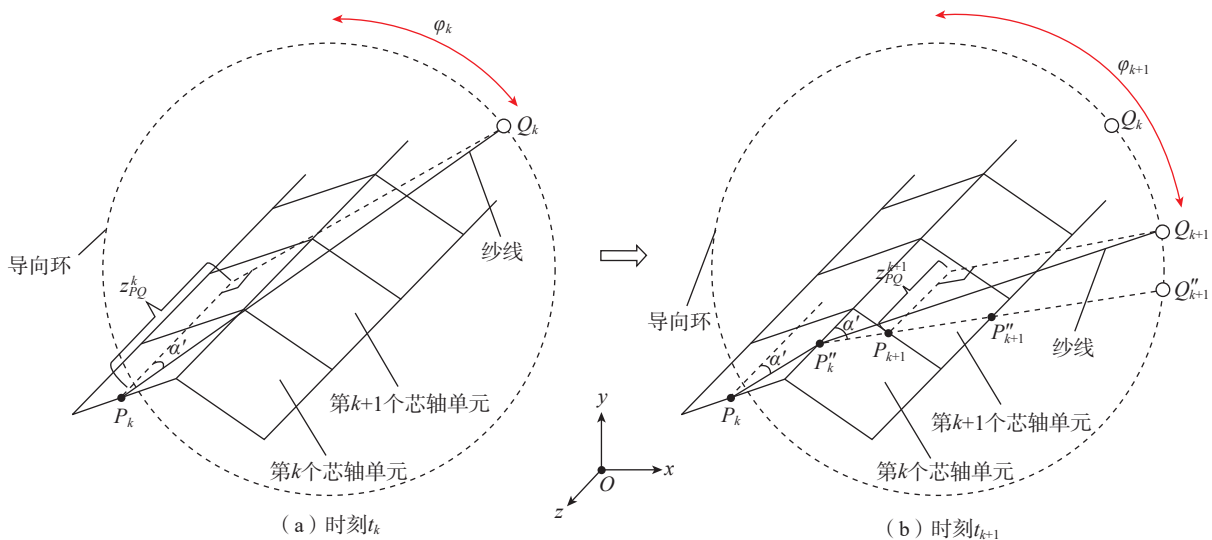


图9 理想运动学模型下碳纤维纱线沉积过程

Fig.9 Process of the carbon fiber yarn deposition in the ideal kinematics model

其中 Δz_{PQ} 为

$$\Delta z_{PQ} = z_{PQ}^{k+1} - z_{PQ}^k \quad (11)$$

式中, z_{PQ}^k 和 z_{PQ}^{k+1} 分别为 P_k 与 Q_k 、 P_{k+1} 与 Q_{k+1} 在芯轴轴向 (z 方向) 上的距离。由前文已经得到, 该纱线在第 k 个饼状芯轴单元的落点坐标 $P_k(x_p^k, y_p^k, z_p^k)$ 和与导向环的接触点坐标 $Q_k(x_Q^k, y_Q^k, z_Q^k)$, 则 z_{PQ}^k 可由式 (12) 计算得到。

$$z_{PQ}^k = \frac{\sqrt{(x_Q^k - x_p^k)^2 + (y_Q^k - y_p^k)^2}}{\tan \alpha'} \quad (12)$$

从而得到以单根纱线为研究对象时, 第 k 个饼状芯轴单元的卷取速度为

$$v_{k,k+1} = \frac{dz_m}{dt_k} \quad (13)$$

对所有 $2m$ 根纱线进行以上计算, 求出 $v_{k,k+1}$ 平均值, 至此完成对第 k 个饼状芯轴单元卷取速度的求解。

2.4 遍历整个芯轴

按照上文所述的一般方法对每个饼状芯轴单元依次求解, 直至到达芯轴末端的最后一个饼状芯轴单元, 得到完整的编织过程卷取速度曲线。

3 仿真及结果分析

3.1 仿真模型构建

反解算法解得芯轴的卷取速度之后, 设定芯轴以此速度进行环形编织, 比较编织增强体的编织角与预期编织角的差距, 可验证反解算法的有效性。

有限元分析 (Finite element analysis, FEA) 利用数学近似的方法对真实物理系统 (几何和载荷工况) 进行模拟, 具有计算精度高, 以及能适应各种复杂形状的优点, 被广泛应用于工程分析。根据实际编织情况构建环形编织的有限元仿真模型, 如图 10 所示, 模型由芯轴、导向环、纱线 3 部分组成, 而编织机框架等部件对编织角的大小并不产生影响, 因此在模型中被忽略。

在正常的编织过程中, 芯轴、导向环不会发生变形, 因此建模为刚体单元。前文已经提到, 碳纤维纱线具有高强度、高模量的特点, 即纱线在编织过程中几乎不会产生轴向形变, 但易产生柔性弯曲^[9]。为了尽可能模拟真实的纱线特点, 将纱线建模为杆单元, 保证轴向强度, 同时划分较密的网格, 使单根纱线的每个单元间可实现类似铰链的自由转动, 模拟纱线柔性。

仿真模型的边界条件按实际情况设定: 导向环固定; 芯轴按反解算法求解得到的卷取速度做水平运动; 线轴划分为经纱和纬纱两组, 间隔排列, 将其设定为绕芯轴轴线的圆周运动, 同时添加在平行于芯轴轴线方向上的往复运动, 组成复合运动, 且经纱组和纬纱组运动方向相反。模拟实际编织中线轴在编织机“8”字形轨

道上的运动。相关参数的默认设置如表 1 所示。

仿真模型中另一项关键设定是碳纤维纱线的材料属性, 直接关系到仿真中碳纤维纱线与芯轴、导向环的接触运算以及纱线间的相互作用^[10]。仿真中设定纱线为 T700 碳纤维纱线, 相关的材料属性参数如表 2 所示。

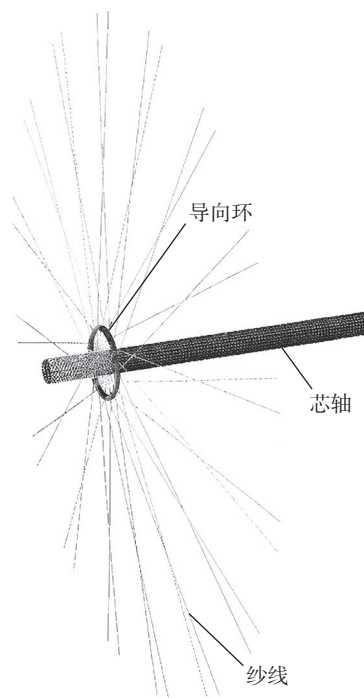


图 10 有限元仿真模型

Fig.10 FEA simulation model

表 1 有限元仿真默认参数

Table 1 Default values of FEA simulation parameters

参数	数值
导向环半径 R/mm	150
芯轴半径 r/mm	50
芯轴长度 L/mm	1500
线轴旋转角速度 $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\pi/10$
纱线数量 ($2m$)	32
纱线轴向牵引力 T/N	10

表 2 碳纤维纱线的材料属性

Table 2 Material properties of carbon fiber yarns

参数	数值
密度 $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.45
弹性模量/GPa	230
泊松比	0.29
纱线间摩擦系数	0.31

纱线间摩擦系数使用 Y151 型纤维摩擦系数测定仪基于绞盘法进行测定,其原理如图 11 所示。首先将纱线均匀包覆在绞盘上,构成摩擦用纤维辊,然后将另一段纱线以一定角度包围在绞盘上,纱线两端使用 150 mg 张力夹头,通过调节纤维辊转速,对纱线动摩擦系数进行测试。根据摩擦欧拉公式,将测试数据代入式(14)可求得摩擦系数 μ 。

$$\mu = \frac{\ln F_1 - \ln F_2}{\sigma} \quad (14)$$

式中, F_1 为绞盘紧端纱线拉力; F_2 为绞盘松端纱线拉力; σ 为纱线与绞盘包围角。

3.2 仿真试验设计

上文的有限元仿真模型可以对编织复合材料制备中的环形编织过程进行有限元仿真。基于此仿真模型,进行芯轴卷取速度反解方法的对比试验。碳纤维编织仿真局部效果如图 12 所示。

具体方法:在其他条件相同的前提下,分别使用本文提出的反解算法与理想运动学方法求解预期编织角所对应的芯轴卷取速度,并在仿真模型中设定芯轴以该速度运动,测量得到编织角大小,并与预期编织角进行比较^[11]。在编织完成的芯轴上每隔 15 mm 取一处测量位置,在每处测量位置芯轴的 +x、+y、-x、-y 4 处测量编织角,并取平均值作为该处测量位置的编织角。

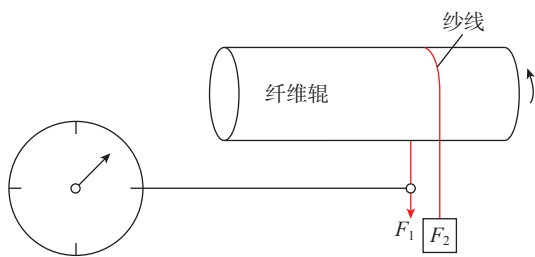


图 11 纱线摩擦系数测定原理
Fig.11 Principle of measuring yarn friction coefficient

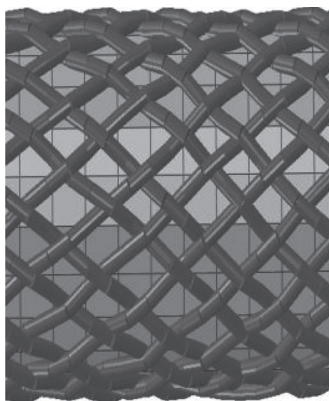


图 12 有限元仿真编织效果
Fig.12 Braiding result of FEA simulation

3.3 仿真试验结果分析

编织角仿真测量统计结果如图 13 所示,定量数据如表 3 所示。仿真试验的预期编织角为 45°,从图 13 可以看到,在编织的开始阶段,按照两种方法求解出的芯轴卷取速度进行编织仿真,所得到的编织角相较于预期编织角均明显偏大。这是因为在编织开始时存在暂态阶段^[12],会聚区长度需要通过芯轴的运动由 0 逐渐增大到预期编织角所对应的会聚区长度,环形编织过程也从此时进入稳态阶段。

从定量数据分析来看,进入稳态后,与暂态阶段相比,编织角标准差显著减小,表明在稳态阶段编织角趋于稳定。另一方面,按照理想运动学反解算法解出的芯轴卷取速度进行编织仿真所得到的编织角,在编织全过程和稳态阶段的平均值都出现了明显的偏小,这与 2.2 节的理论分析是一致的。而本文提出的反解算法由于考虑了会聚区内的纱线在编织过程中相互作用的影响,仿真得到的编织角在编织全过程和稳态阶段的平均值都要更接近于预期编织角。

同时,为探究纱线轴向牵引力设置对仿真结果的影响,将纱线轴向牵引力由默认设置的 10 N 更改为 5 N,

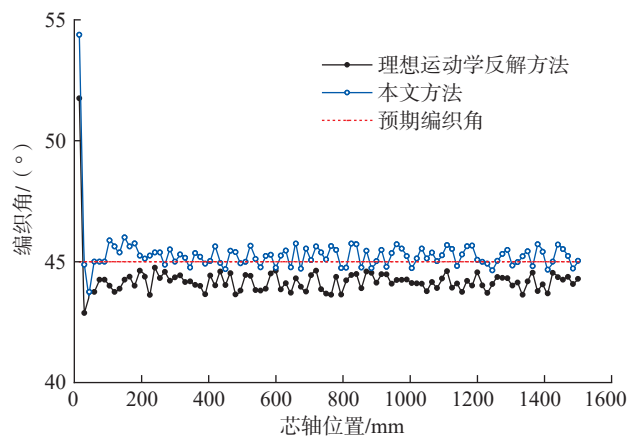


图 13 有限元仿真试验统计结果
Fig.13 Statistical results of FEA simulation

表 3 有限元仿真试验数据
Table 3 Datas of FEA simulation

编织角	全过程		暂态阶段		稳态阶段	
	理想运动学反解方法	本文方法	理想运动学反解方法	本文方法	理想运动学反解方法	本文方法
编织角平均值/(°)	44.209	45.297	—	—	44.161	45.218
编织角标准差/(°)	—	—	2.524	2.980	0.297	0.334

再次进行环形编织仿真试验。图 14 (a)和 (b)分别为轴向牵引力设置为 10 N 和 5 N 时的仿真局部结果,图中的红线为其中一根纱线的沉积轨迹。可以看到,当纱线的轴向牵引力减小后,各纱线单元间的段落感更加明显,对编织角的稳定性也产生了一定影响。

4 实物试验及结果分析

4.1 实物试验设计

为进一步验证本文编织复合材料制备卷取速度反解算法的有效性,搭建了图 15 所示的 192 线轴环形编织机试验平台,相关的固定参数如表 4 所示。同样地,在其他条件相同的前提下,分别使用本文提出的反解算法与理想运动学方法求解预期编织角所对应的芯轴卷取速度,并控制机械臂抓取芯轴以该速度运动,测量得到编织角大小,并与预期编织角比较。编织角测量采用拓印法^[13-14],在编织完成的芯轴上每隔 10 mm 取一处测量位置,在每处测量位置芯轴的 +x、+y、-x、-y 4 处测量编织角,取平均值作为该处测量位置的编织角。实际

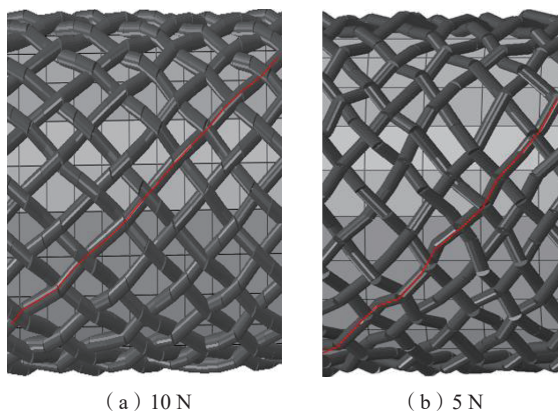


图 14 不同轴向牵引力的环形编织局部有限元仿真

Fig.14 Local FEA simulation of annular braid with different axial traction forces

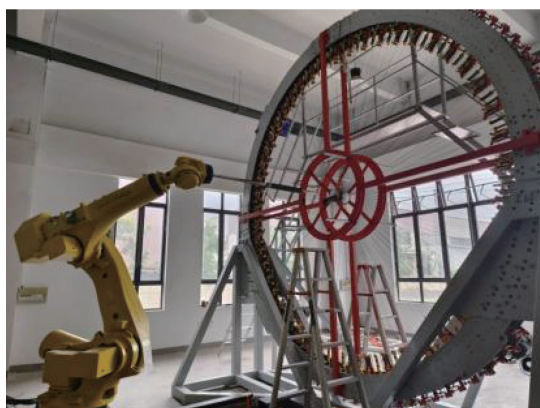


图 15 环形编织试验平台

Fig.15 Circular braiding experimental platform

编织效果如图 16 所示。

4.2 实物试验结果分析

试验的编织角测量统计结果如图 17 所示,定量数据如表 5 所示。试验的预期编织角为 45°,从图 17 可以看到,与仿真试验相同,在开始编织的暂态阶段,按照两种方法求解出的芯轴卷取速度进行编织,所得到的编织角比预期编织角大,其标准差也显著大于稳态阶段。进

表 4 实物试验参数

Table 4 Physical experiment parameters

参数	数值
导向环半径 R/mm	75
芯轴半径 r/mm	31.5
芯轴长度 L/mm	500
线轴旋转角速度 $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.087
纱线数量 $(2m)$	192



图 16 碳纤维纱线编织效果

Fig.16 Braiding result of carbon fiber yarns

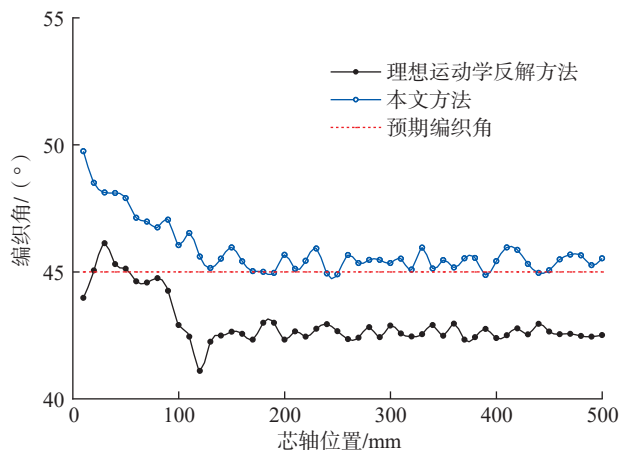


图 17 实物试验统计结果

Fig.17 Statistical results of physical experiment