・计算材料学・

面向环形编织的芯轴牵引轨迹生成与采样算法

茅睿浩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 321000)

文 摘 为提高环形编织精度,本文提出了一种根据芯轴形状以及目标编织角,生成芯轴牵引轨迹的算法。在轨迹生成阶段,考虑了暂态过程中收敛区长度与夹角的变化,提出了动态编织模型,提高了牵引轨迹的生成精度。在轨迹采样阶段,同时考虑轨迹的空间特征和速度特征,使用自适应采样算法,使采样轨迹尽可能接近原始轨迹,保证最终的编织精度。仿真与实物试验表明,针对复杂芯轴和非恒定目标编织角,本文算法具有更小的编织角误差。

关键词 环形编织,编织角,机械臂,轨迹采样 中图分类号:TS101.1 DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.02.004

Mandrel Traction Trajectory Generation and Sampling Algorithm for Circular Braiding

MAO Ruihao¹ FAN Zhen^{1,2} ZHANG Senlin^{1,2}

(1 College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)
 (2 Jinhua Institute of Zhejiang University, Jinhua 321000)

Abstract In order to improve the accuracy of circular braiding, an algorithm to generate the mandrel traction trajectory according to the mandrel shape and the target braid angle was proposed. In the trajectory generation stage, the changes in the length and angle of the convergence zone in the transient process were considered, and a dynamic braiding model was proposed to improve the generation accuracy of the traction trajectory. In the trajectory sampling stage, the spatial characteristics and speed characteristics of the trajectory were considered at the same time, and an adaptive sampling algorithm was used to make the sampled trajectory as close to the original trajectory as possible to ensure the final braiding accuracy. Simulation and physical tests show that for complex mandrels and non–constant target braid angles, the algorithm in this paper has a smaller braid angle error.

Key words Circular braiding, Braid angle, Robot, Trajectory sampling

0 引言

环形编织是制备纤维增强复合材料的重要手段。环形编织中,碳纤维在芯轴表面交织并附着,形成纤维增强体。通过将液态树脂注入纤维增强体并固化,即可得到纤维增强复合材料构件。纤维增强复合材料具有高强度、轻量化、抗腐蚀等特性,在航空航天领域有着越来越广泛的应用^[1]。我国在研的CR929客机的纤维增强复合材料预期用量在50%以上,美国Rocket Lab 新式的 ELECTRON 火箭更是几

乎全部采用了纤维增强复合材料。纤维增强复合材 料中纤维束的取向,即编织角,是影响其力学性能差 异的重要因素之一^[2]。而编织角的大小又直接受芯 轴牵引轨迹、牵引速度、编织机转速等编织工艺参数 的影响。因此,根据目标编织角大小,设计合适的编 织工艺参数,是纤维增强复合材料制备过程中的一 个关键问题。

国内外学者围绕环形编织已开展了一系列的研究,其研究的重点主要集中于编织角预测。G. DU和

收稿日期:2023-11-13

基金项目:浙江省"尖兵""领雁"研发攻关计划项目-智能制造与高端装备专项(2022C01237)

第一作者简介:茅睿浩,1998年出生,硕士,主要从事环形编织工艺研究工作。E-mail: mao980308@163.com

P. POPPER^[3]针对轴对称芯轴进行了研究,建立了用 于编织角预测的运动学模型。W. J. NA等人^[4]提出 了最短路径法,可用于预测非轴对称芯轴的编织效 果。J. H. VAN RAVENHORST等人^[5]通过对纤维进 行受力分析,建立了环形编织的运动学模型。近几 年,有限元方法被应用于编织过程仿真,使复杂芯轴 的模拟编织成为可能,T. HANS等人^[6]将纤维建模为 桁架单元,模拟了纤维的交织过程,但同时,有限元 方法也存在着计算开销大的问题^[7]。

相较于编织角预测,根据目标编织角确定工艺 参数对生产制造更具有指导意义。A. FOULADI等 人^[8]推导了矩形截面芯轴的工艺参数优化方法。P. MONNUT等人^[9]提出了一种利用逆运动学计算编织 工艺参数的方法,并用于飞机零部件的制造。吴杰 伟等人^[10]针对等覆盖率变径编织情况,设计了芯轴 牵引速度计算方法。M. GONDRAN等人^[11]利用仿真 与试验相结合的方式,提出了牵引速度的迭代优化 算法。Q. LI等人^[12]针对弯曲芯轴,提出一种偏心编 织方法,提高了纤维分布的均匀度。

在实际编织中,芯轴的牵引往往是通过机械臂 来实现的^[13],因此,生成轨迹时需要考虑机械臂的运 动特性。常见工业机械臂的控制通常是通过输入一 系列关键路径点来实现的,而相邻路径点之间的运 动方式则由机械臂自身的控制器决定,其中最常见 的是直线插补方式。X. CHI等人^[14]将芯轴分割为离 散的小段,每一段的编织通过机械臂的一次转动和 两次平移来实现。J. HAN等人^[15]设计了机械臂离线 编程系统,可根据芯轴形状选取路径点,并转换为机 械臂控制程序。

为提高环形编织精度,本文提出了一种根据芯 轴形状以及目标编织角,生成芯轴牵引轨迹的算法。 首先,利用运动学模型对编织过程进行建模,并考虑 编织暂态过程,生成理想的芯轴连续牵引轨迹;其 次,将连续轨迹转换为离散路径点序列,用于生成机 械臂控制指令,通过使用自适应采样算法,减小采样 轨迹与原始轨迹之间的偏差,保证编织精度。

1 环形编织数学模型

环形编织示意图见图1,简化后的单纤维束编织 模型见图2。其主要组成部分包括芯轴、导向环、纤 维束、编织机、携纱器、机械臂等。芯轴由机械臂夹 持,夹持位置为芯轴首端。纤维束从编织机上的携 纱器中引出,经过导向环,固定至芯轴首端。编织 时,编织机的两组携纱器分别以顺时针和逆时针的 方式做圆周运动,芯轴在机械臂牵引下沿编织机轴 向方向运动,纤维束跟随其运动,实现交织,并逐渐 - 28 - 附着于芯轴表面,形成纤维增强体。使用不同形状 的芯轴,即可编织得到不同形状的纤维增强体。







Fig. 2 Single fiber braiding model

以编织机中心点为原点建立世界坐标系 $\{x_{g}, y_{g}, z_{g}\}$ 。在编织过程中,芯轴由机械臂夹持并牵引,因此最终求解得到的牵引路径、牵引速度使用机械臂末端工具中心点(Tool Center Point,TCP)在世界坐标系下的位姿和移动速度进行描述。以TCP为原点建立工具坐标系 $\{x_{i}, y_{i}, z_{i}\}$ 。机械臂夹取芯轴后,芯轴和机械臂的相对位姿不再变化,因此对芯轴的建模和描述在工具坐标系下进行。在夹取芯轴时,通过调整位置,使芯轴首端面垂直于 z_{i} 轴,且首端面中心点O。与TCP重合。

1.1 芯轴模型

使用芯轴中心线来描述芯轴的整体形状特征。 芯轴中心线可以表示为工具坐标系下的一根空间曲 线。对于中心线上一点,若其到中心线首端点O。之 间的曲线长度为*l*,则称该点位于芯轴上位置*l*处, O<*l*<*L*,*L*为芯轴中心线的总长度。

使用芯轴各个位置的半径、锥角来描述芯轴的 局部形状特征。芯轴上位置*l*处的中心线坐标记为*C* (*l*)=(*x*_e(*l*),*y*_e(*l*),*z*_e(*l*)),中心线切向量记为*T*(*l*),其 宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第2期 法平面截取得到的芯轴横截面记为*S*(*l*)。对于圆形 横截面,可直接测得其半径,对于非圆形横截面,可 以首先测量其周长,再由式(1)计算其等效半径:

$$r(l) = \frac{c(l)}{2\pi} \tag{1}$$

式中,*r*(*l*)为芯轴上位置*l*处的等效半径,*c*(*l*)为芯轴 上位置*l*处的横截面周长。

对于变截面芯轴,其等效半径随着芯轴位置的 变化而变化。取芯轴上的一小段切片,可根据等效 半径将其近似为圆台模型,如图3所示。





当圆台高度趋近于无穷小时,可根据式(2)计算 其等效半锥角:

$$\gamma(l) = \arctan \frac{\mathrm{d}r(l)}{\mathrm{d}l} \tag{2}$$

式中,γ(l)为芯轴上位置l处的等效半锥角。

使用芯轴各个位置的目标编织角来描述纤维增 强体的设计目标,编织角是纤维束与芯轴表面母线之 间的夹角。芯轴上位置*l*处的目标编织角记为α_i(*l*)。

1.2 收敛区模型

纤维束在芯轴表面附着的位置称为编织点,纤 维束与导向环接触的位置称为导向点,编织点至导 向环之间的区域称为收敛区。用收敛区长度*h*与收 敛区夹角θ两个参数对收敛区状态进行描述,如图4 所示。其中,收敛区长度指编织点到导向环之间的 距离,收敛区夹角指编织点与导向点两点之间相对 于芯轴中心线转过的角度。在收敛区中,忽略纤维 束之间的摩擦力,纤维束在张力的作用下呈直线状 态,且与芯轴相切于编织点处。



Fig. 4 Convergence zone model

将芯轴段近似为圆台模型后,可根据几何关系, 得到编织角、芯轴形状、收敛区长度、收敛区夹角之 间的关系表达式:

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{R_g^2 - (r + h \tan \gamma)^2}}{h} \cos \gamma$$
(3)

$$\cos\theta = \frac{r+h\tan\gamma}{R_{\rm g}} \tag{4}$$

式中,α为编织角大小,h为收敛区长度,θ为收敛区 夹角,R_a为导向环半径。

当已知目标编织角和芯轴形状时,可以计算得 到期望的收敛区长度与收敛区夹角:

$$h_{t}(l) = \frac{-r(l)\tan\gamma(l) + \sqrt{\left(r(l)\tan\gamma(l)\right)^{2} - \left(\frac{\tan^{2}\alpha_{t}(l)}{\cos^{2}\gamma(l)} + \tan^{2}\gamma(l)\right)\left(r^{2}(l) - R_{g}^{2}\right)}}{\frac{\tan^{2}\alpha_{t}(l)}{\cos^{2}\gamma(l)} + \tan^{2}\gamma(l)}$$
(5)

$$\theta_{t}(l) = \arccos\left(\frac{r(l) + h_{t}(l)\tan\gamma(l)}{R_{g}}\right)$$
(6)

式中,h_t(l)为编织进行至位置l处时期望的收敛区长度,θ_t(l)为编织进行至位置l处时期望的收敛区夹角。为保证纤维增强体的编织角大小与设计目标一致,编织过程中需通过牵引芯轴来保证实际收敛区长度与期望值相等。

1.3 动态编织模型

纤维束在芯轴上编织附着的过程,可视为编织 点在芯轴表面作螺旋运动的过程。一方面,编织点 宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第2期 会在芯轴牵引运动的带动下沿芯轴中心线方向前进,其移动速度称为编织行进速度;另一方面,它会在编织机旋转运动的带动下围绕芯轴中心线做圆周运动,其转速称为编织角速度。编织角的大小由编织点的运动直接决定:

$$\alpha(l) = \arctan \frac{\omega_{\rm b}(l)r(l)\cos\gamma(l)}{v_{\rm b}(l)}$$
(7)

式中, $\alpha(l)$ 为芯轴上位置l处的编织角大小, $v_b(l)$ 为编 织进行至位置l处时的编织行进速度, $\omega_b(l)$ 为编织进 行至位置l处时的编织角速度。

— 29 —

编织过程可分为稳态过程和暂态过程。在稳态 过程中,编织点以稳定的速度运动,编织行进速度等 于芯轴抽取速度,编织角速度等于编织机转速,并 且,收敛区状态保持不变,编织角大小保持稳定。

当工艺参数发生变化,或芯轴形状发生变化时, 会引起编织的暂态过程。在暂态过程中,编织点的 运动速度和收敛区状态均会发生变化。在已有研究 中,往往使用不考虑暂态过程的静态模型,或是对暂 态过程分析不全面,仅考虑收敛区长度产生的影响。 为提高建模准确性,本文提出一种同时考虑收敛区 长度与收敛区夹角的动态编织模型。

具体而言,在暂态过程中,芯轴牵引运动一方面 会引起编织点的轴向移动,另一方面会导致收敛区 长度发生变化。因此,芯轴牵引速度可以分解为编 织行进速度和收敛区长度变化率两个分量,如式(8) 所示。而编织机旋转运动一方面会引起编织点的圆 周运动,另一方面会导致收敛区夹角发生变化。因 此,编织机转速可以分解为编织角速度和收敛区夹 角变化率两个分量,如式(9)所示:

$$v(l) = v_{\rm b}(l) + \frac{\mathrm{d}h(l)}{\mathrm{d}t} = v_{\rm b}(l) + \frac{\mathrm{d}h(l)}{\mathrm{d}l} \cdot v_{\rm b}(l) \quad (8)$$

$$\omega(l) = \omega_{\rm b}(l) + \frac{\mathrm{d}\theta(l)}{\mathrm{d}t} = \omega_{\rm b}(l) + \frac{\mathrm{d}\theta(l)}{\mathrm{d}l} \cdot v_{\rm b}(l) \quad (9)$$

式中,v(l)为编织进行至位置l处时的芯轴牵引速度, w(l)为编织进行至位置l处时的编织机转速。式(7) ~式(9)描述了工艺参数和编织角之间的动态关系。 在生成牵引轨迹时,将暂态过程的影响考虑在内,有 助于减小编织误差。

2 牵引轨迹生成与采样

芯轴牵引轨迹由牵引路径以及对应的牵引速度 两部分组成。为求取芯轴牵引轨迹,首先根据动态 编织模型,生成连续牵引路径和牵引速度,然后通过 采样算法,获得关键路径点以及相邻路径点间的平 均牵引速度,用于生成机械臂控制指令。

2.1 牵引路径生成

使用TCP位姿的移动路线表示芯轴牵引路径:

 $P(l) = \left(x_{\mathrm{p}}(l), y_{\mathrm{p}}(l), z_{\mathrm{p}}(l), \varphi_{\mathrm{x}}(l), \varphi_{\mathrm{y}}(l), \varphi_{\mathrm{z}}(l)\right) \quad (10)$

式中,P(l)为编织进行至位置l处时,TCP的位姿; x_p (l), $y_p(l)$, $z_p(l)$ 为TCP此时在世界坐标系下的坐标 值; $\varphi_x(l)$, $\varphi_y(l)$, $\varphi_z(l)$ 为TCP此时的姿态,即依次绕 x_g 轴旋转 $\varphi_x(l)$,绕 y_g 轴旋转 $\varphi_y(l)$,绕 z_g 轴旋转 $\varphi_z(l)$ 后对 应的姿态。在编织过程中,芯轴需要以垂直的方式 抽离编织机中心,如图5所示。

当编织进行至位置l处时,芯轴位姿应满足以下两个要求:(1)芯轴中心线切向量T(l)与编织机中轴线平行;(2)芯轴截面中心点C(l)位于编织机中轴线 - 30 -



上,且到导向环的距离等于期望的收敛区长度h_t(l)。

初始状态下,工具坐标系与世界坐标系重合。 为满足芯轴中心线切向量与编织机中轴线平行,可 令芯轴绕轴 $\mathbf{n}_{o}(l) = (n_{ax}(l), n_{oy}(l), n_{ax}(l))旋转 \varphi_{o}(l), 使$ $得向量<math>T(l) = \mathbf{n}_{b}$ 平行,其中 $\mathbf{n}_{b} = (0, 0, 1),$ 表示编织机 中轴线方向。 $\mathbf{n}_{o}(l) = \varphi_{o}(l)$ 的计算公式如下:

$$\boldsymbol{n}_{\circ}(l) = \frac{\boldsymbol{T}(l) \times \boldsymbol{n}_{\rm b}}{\left|\boldsymbol{T}(l) \times \boldsymbol{n}_{\rm b}\right|}$$
(11)

$$\boldsymbol{\varphi}_{o}(l) = \arccos \frac{\boldsymbol{T}(l) \times \boldsymbol{n}_{b}}{|\boldsymbol{T}(l)| \times |\boldsymbol{n}_{b}|}$$
(12)

该旋转变换对应的旋转矩阵R(l)计算如下:

$$\boldsymbol{R}(l) = \begin{bmatrix} n_{\alpha x}^{2} k + c & n_{\alpha x} n_{\alpha y} k - n_{\alpha z} s & n_{\alpha z} n_{\alpha x} k + n_{\alpha y} s \\ n_{\alpha x} n_{\alpha y} k + n_{\alpha z} s & n_{\alpha y}^{2} k + c & n_{\alpha z} n_{\alpha y} k - n_{\alpha x} s \\ n_{\alpha x} n_{\alpha z} k - n_{\alpha y} s & n_{\alpha y} n_{\alpha z} k + n_{\alpha x} s & n_{\alpha z}^{2} k + c \end{bmatrix}$$
(13)

式中, $c=\cos\varphi_{\circ}(l)$, $s=\sin\varphi_{\circ}(l)$, $k=1-\cos\varphi_{\circ}(l)$ 。

当 $n_{\rm b}=(0,0,1)$ 时,上式可化简为:

$$\boldsymbol{R}(l) = \begin{bmatrix} n_{ox}^{2}k + c & n_{ox}n_{oy}k & n_{oy}s \\ n_{ox}n_{oy}k & n_{oy}^{2}k + c & -n_{ox}s \\ -n_{oy}s & n_{ox}s & c \end{bmatrix}$$
(14)

旋转变换后,芯轴截面中心点的坐标为C'(l)= $(x'_{c}(l), y'_{c}(l), z'_{c}(l)),$ 其计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_{c}'(l) \\ y_{c}'(l) \\ z_{c}'(l) \end{bmatrix} = \mathbf{R}(l) \cdot \begin{bmatrix} x_{c}(l) \\ y_{c}(l) \\ z_{c}(l) \end{bmatrix}$$
(15)

为满足芯轴截面中心点位于编织机中轴线上, 且到导向环的距离等于期望的收敛区长度,可对芯 轴进行平移。平移后,芯轴截面中心点为 $C''(l)=(0, 0, -h_i(l)-d)$,此时对应的 TCP 坐标 $(x_p(l), y_p(l), z_p(l))$;

$$\begin{cases} x_{p}(l) = -x'_{c}(l) \\ y_{p}(l) = -y'_{c}(l) \\ z_{p}(l) = -z'_{c}(l) - h(l) - d \end{cases}$$
(16)

式中, d为导向环中心点到编织机中心点的距离。

宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第2期

为描述 TCP 姿态, 需计算表示姿态的旋转角 φ_x (*l*), $\varphi_y(l)$, $\varphi_z(l)$ 。芯轴绕轴 $n_o(l)$ 旋转 $\varphi_o(l)$ 实现的旋

$$\boldsymbol{R}'(l) = \begin{bmatrix} c_z \cdot c_y & -s_z \cdot c_x + c_z \cdot s_y \cdot s_x & s_z \cdot s_x + c_z \cdot s_y \cdot c_x \\ s_z \cdot c_y & c_z \cdot c_x + s_z \cdot s_y \cdot s_x & -c_z \cdot s_x + s_z \cdot s_y \cdot c_x \\ -s_x & c_x \cdot s_x & c_x \cdot c_x \end{bmatrix}$$
(17)

式中, $c_x = \cos\varphi_x(l)$, $c_y = \cos\varphi_y(l)$, $c_z = \cos\varphi_z(l)$, $s_x = \sin\varphi_x(l)$, $s_y = \sin\varphi_y(l)$, $s_z = \sin\varphi_z(l)$ 。使用以上两种旋转变换得到 的效果相同,因此有 $\mathbf{R}(l) = \mathbf{R}'(l)$,可解得 $\varphi_x(l)$, $\varphi_y(l)$, $\varphi_y(l)$, $\varphi_z(l)$:

$$\varphi_{x}(l) = \arcsin \frac{n_{\text{ox}}(l) \cdot \sin \varphi_{0}(l)}{\cos \varphi_{y}(l)}$$

$$\varphi_{y}(l) = \arcsin \left(n_{\text{oy}}(l) \cdot \sin \varphi_{0}(l) \right) \qquad (18)$$

$$\varphi_{z}(l) = \arcsin \frac{n_{\text{ox}}(l) \cdot n_{\text{oy}}(l) \cdot \left(1 - \cos \varphi_{0}(l) \right)}{\cos \varphi_{y}(l)}$$

根据式(16)、式(18)可描述芯轴牵引路径P(l)。

2.2 牵引速度生成

根据动态编织模型可知,芯轴牵引速度需要与 编织机转速相互配合,从而使编织角大小符合设计 目标。在实际编织中,编织机转速为固定值,因此可 以根据转速和目标编织角大小,求解芯轴牵引速度。

首先,联立式(7)、式(9),解得已知编织机转速 时对应的编织角速度:

$$\omega_{\rm bt}(l) = \frac{\omega}{1 + \frac{\mathrm{d}\theta_{\rm t}(l)}{\mathrm{d}l} \cdot \frac{r(l)\cos\gamma(l)}{\tan\alpha_{\rm t}(l)}} \tag{19}$$

式中, ω 为编织机转速, $\omega_{bl}(l)$ 为编织进行至位置l处时期望的编织角速度。之后,联立式(7)、式(19),解得目标编织角 $\alpha_{l}(l)$ 所对应的期望编织行进速度:

$$v_{\rm bt}(l) = \frac{\omega r(l) \cos \gamma(l)}{\tan \alpha_{\rm t}(l) + r(l) \cos \gamma(l) \cdot \frac{\mathrm{d}\theta_{\rm t}(l)}{\mathrm{d}l}}$$
(20)

式中,*v*_{bt}(*l*)为编织进行至位置*l*处时期望的编织行进速度。最后,将式(20)代入式(8),解得编织所需的芯轴牵引速度:

$$v_{t}(l) = \frac{\omega r(l) \cos \gamma(l) \left(1 + \frac{\mathrm{d}h_{t}(l)}{\mathrm{d}l}\right)}{\tan \alpha_{t}(l) + r(l) \cos \gamma(l) \cdot \frac{\mathrm{d}\theta_{t}(l)}{\mathrm{d}l}}$$
(21)

式中,v_i(*l*)为编织进行至位置*l*处时期望的芯轴牵引速度,即考虑了编织暂态过程后,实际所需的芯轴牵引速度。

2.3 自适应轨迹采样

常见的工业机械臂通过输入关键轨迹点的方式 来确定运动轨迹,因此需要对连续轨迹进行采样,获 得路径采样点以及对应的速度。TCP位置的连续运 动路径可视为一条空间曲线Q(l)=(x_p(l),y_p(l),z_p(l))。 常见的空间曲线采样方法有等弧长采样法、等参数 采样法、基于曲线特征函数的采样方法等^[16]。其中, 宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第2期 基于曲线特征函数的采样方法可以根据曲线的扭曲程 度,自适应地分配采样点的疏密,有助于提高采样质量。

转变换,也可通过依次绕 x_x 轴, y_x 轴, z_x 轴旋转 $\varphi_x(l), \varphi_y$

 $(l), \varphi_{l}(l)$ 实现,该旋转变换对应的旋转矩阵计算为:

对于牵引轨迹而言,采样时不仅需要考虑其空间特征,还需要考虑其移动速度。因此,本文将速度 特征引入到特征函数内,提出一种扩展的曲线特征 函数,并设计了自适应轨迹采样算法。

对于曲线Q(l)的空间特征,可以使用弧长、曲率 和挠率进行描述,三者分别描述了曲线的长度、弯曲 程度和扭转程度^[17],计算式如下:

$$s(l) = \int_{0}^{l} \left\| \dot{Q}(t) \right\| \mathrm{d}t \tag{22}$$

$$\kappa(l) = \frac{\left\| \dot{Q}(l) \times \ddot{Q}(l) \right\|}{\left\| \dot{Q}(l) \right\|^3}$$
(23)

$$\tau(l) = \frac{\det\left(\dot{Q}(l), \ddot{Q}(l), \ddot{Q}(l)\right)}{\left\|\dot{Q}(l) \times \ddot{Q}(l)\right\|^{3}}$$
(24)

式中,s(l), $\kappa(l)$, $\tau(l)$ 分别为l对应位置处的弧长、曲率和挠率。

使用速度沿曲线的变化率描述牵引轨迹的速度特征,即*i*(*l*)。综上特征量,得到扩展的曲线特征函数:

$$g(l) = a_{1} \cdot \frac{s(l)}{s(L)} + a_{2} \cdot \frac{\int_{0}^{L} \kappa(t) dt}{\int_{0}^{L} \kappa(t) dt} + a_{3} \cdot \frac{\int_{0}^{l} |\tau(l)| dt}{\int_{0}^{L} |\tau(l)| dt} + a_{4} \cdot \frac{\int_{0}^{l} |\dot{v}(l)| dt}{\int_{0}^{L} |\dot{v}(l)| dt}$$
(25)

式中, a_1 , a_2 , a_3 , a_4 为权重参数,满足 $0 \le a_1$, a_2 , a_3 , $a_4 \le 1$, 且 $a_1+a_2+a_3+a_4=1$ 。特征函数g(l)在区间[0,L]上单调 递增,且 $0 \le g(l) \le 1$ 。在一段曲线上,特征函数增长较 快,则说明牵引路径扭曲程度较大,或牵引速度变化 较大,需要更多的采样点以提高拟合效果,反之亦然。

包括牵引路径首尾端点在内的N个采样点,将 牵引路径分割为N-1段。路径采样点记为 $Q_i=Q(l_i)$, $i=1,\dots,N,$ 采样点 Q_i 与 Q_{i+1} 之间的曲线段记为 U_i ,连 接 Q_i 与 Q_{i+1} 的直线段记为 V_i 。

采样后,TCP以匀速方式沿V,运动,其速度取原 轨迹的平均牵引速度,计算公式如下:

$$v_{i} = \frac{\int_{l_{i}}^{l_{i+1}} Q(l) dl}{\int_{l_{i}}^{l_{i+1}} \frac{1}{v_{\text{bt}}(l)} dl}$$
(26)

— 31 —

式中,*v*_i为机械臂沿*V*_i运动时的速度。为评估采样轨 迹与原始轨迹之间的偏差大小,使用距离偏差和速 度偏差对其进行评价,计算公式如下:

$$e_{\mathrm{d},i} = \max d(Q(l), V_i), l_i \leq l \leq l_{i+1}$$

$$(27)$$

$$v_{\mathbf{v},i} = \max \left| v_{\mathbf{t}}(l) - v_{i} \right|, l_{i} \le l \le l_{i+1}$$

$$(28)$$

式中, $e_{d,i}$ 为 V_i 和 U_i 之间的距离偏差, $e_{v,i}$ 为 V_i 和 U_i 之间 的速度偏差, $d(Q(l), V_i)$ 为点Q(l)到直线 V_i 的距离。 对于曲线 U_i ,若其距离偏差小于距离偏差阈值 ε_d ,且 速度偏差小于速度偏差阈值 ε_v 时,则不再进一步对 其采样。自适应轨迹采样采用逐步细分的方式进 行,其流程如图6所示。



图 6 采样算法流程图 Fig. 6 Flow chart of sampling algorithm

首先,将曲线首尾端点设为采样点。之后,遍历 所有曲线段 U_i ,若其距离偏差或速度偏差大于阈值, 则在此曲线段上确定一个新采样点Q' = Q(l'), l'满 $\mathcal{L}g(l') = (g(l_i) + g(l_{i+1}))/2。遍历完成后,若此轮遍$ 历中无新增的采样点,则采样结束,否则,更新采样结果并重新遍历,直至无新增采样点。

上述流程得到了所有路径采样点的坐标 $Q_i = (x_p (l_i), y_p(l_i), z_p(l_i))$,通过对照原始牵引路径 P(l),可以 得到对应的 TCP 姿态 $\varphi_x(l_i), \varphi_y(l_i), \varphi_z(l_i)$ 。将采样点 Q_i 和对应的 TCP 姿态 $\varphi_x(l_i), \varphi_y(l_i), \varphi_z(l_i)$,以及牵引速 - 32 - 度 v_i输入机械臂控制器,即可生成机械臂运动轨迹。 3 试验与分析

为验证本文所述方法的有效性,使用螺旋桨桨 叶形芯轴进行仿真及实物试验。芯轴外形如图7所 示,总长为1700mm,扭转角为15°。桨根截面为圆 形,半径为50mm,桨身400mm处宽度达到最大值, 为300mm,桨尖末端宽度为150mm。编织机锭数为 192,转速为5°/s,导向环半径为200mm。编织由桨 根开始,向桨尖方向进行。



Fig. 7 Blade shaped mandrel

3.1 仿真试验

3.1.1 动态编织模型仿真

基于上述芯轴,设计如下目标编织角:从桨根出 发,0~400 mm 段目标编织角 30°,400~700 mm 段,目 标编织角由 30°均匀增加至 60°,700~1 700 mm 段目 标编织角 60°。针对变截面芯轴,X. CHI等^[14]通过分 析收敛区长度变化,提出了牵引速度的补偿算法,减 小了编织角大小的波动。为验证本文所提动态编织 模型的性能,分别使用本文方法、X. CHI所提方法以 及静态模型方法求取编织所需的芯轴牵引轨迹,并 使用仿真算法对编织过程进行模拟^[18],计算编织角 大小以及与设计目标的偏差。仿真初始条件设置如 下:初始收敛区长度为 340 mm,纤维一端已固定至桨 根边缘,且与模型表面相切。仿真结果如图 8 所示。

在编织的前400 mm段,芯轴从桨根部分至桨身 部分存在明显的尺寸变化,暂态过程影响较大,3种 算法均出现了一定的波动。其中,本文方法的最大 编织角误差最小,为1.79°,X.CHI所提方法的编织 角误差为4.48°,静态模型方法的编织角误差为4.56°。 在编织的400~700 mm段,目标编织角发生变化,静 态模型方法由于未考虑状态变化时的暂态过程,无 法实现对目标编织角的跟踪,且误差逐渐增大,而另 外两种方法较好地跟踪了目标编织角的变化。编织 的700~1700 mm段,目标编织角保持恒定,但芯轴尺 寸仍存在小幅度变化。1200 mm之后,3种方法的编 织角大小均趋于平稳。其中,本文方法由于同时考 虑了暂态过程中的收敛区长度及收敛区夹角的变 化,编织角误差最小,为0.04°,X.CHI所提方法的编

宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第2期

织角误差为0.25°,静态模型方法的编织角误差为 4.00°。3种算法整体的最大误差与均方根误差见表 1,可知,使用本文方法后,编织角的最大误差以及均方 根误差均有所减小,证明了动态编织模型的有效性。



表1 不同轨迹生成方法的编织角误差 Tab.1 Braid angle error of different trajectory generation methods

方法	最大误差/(°)	均方根误差/(°)
本文方法	1.79	0.55
X.CHI所提方法	4.48	1.18
静态模型方法	22.19	9.32

3.1.2 轨迹采样仿真

对求解得到的连续轨迹进行采样,采样算法相 关参数设置如下:特征函数权重值*a*₁=0.25,*a*₂=0.25, *a*₃=0.25,*a*₄=0.25。通过调节距离偏差阈值*ε*_d和速度 偏差阈值*ε*_v,可以调整轨迹的采样精度。阈值越小, 则采样精度越高,采样点数量也越多。为比较不同 精度下的采样效果,设置不同的阈值进行仿真试验。 阈值设置及仿真结果见表2,可知,随着阈值的减小, 采样点数量逐步增加。当采样点数量由7增加到11 时,编织角误差明显减小,采样质量上升;而随着采 样点数量的进一步增加,采样轨迹已经比较接近原 始轨迹,采样点数量提升带来的收益已不明显。

作为对比,使用等弧长采样法,将采样点数依次 宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第2期 设置为7、11、17,比较两种采样方法的效果,结果见 表3,可知,当采样点数相同时,本文方法的采样轨迹 具有更小的编织角误差,说明其采样点更好地拟合 了原始连续牵引轨迹,验证了本文方法的有效性。

表 2 不同阈值下的采样效果 Tab. 2 Sampling result of different threshold

	1 8			
距离偏差 阈值/mm	速度偏差 阈值/mm·s ⁻¹	采样点 数量	最大误差 /(°)	均方根 误差/(°)
40	15	7	5.10	1.71
15	10	11	3.55	1.03
3	3	17	3.58	1.00

表3 不同采样方法对比

Tab. 3	Result of	different	sampling	methods
--------	-----------	-----------	----------	---------

采样	本文	工 方法	等弧长	采样方法
点数	最大误差/(°)	均方根误差/(°)	最大误差/(°)	均方根误差/(°)
7	5.10	1.71	10.73	3.12
11	3.55	1.03	4.93	1.52
17	3.58	1.00	4.09	1.12

3.2 实物试验

使用192锭环形编织机进行实物试验,编织机转速 为5°/s,导向环半径为200mm。编织材料为12K碳纤 维,目标编织角大小设定与仿真试验保持一致。芯轴牵 引轨迹采用自适应采样算法得到的17采样点离散轨 迹。与X.CHI所提方法^[14]进行对比,结果见图9。

— 33 —

根据图9可得,两种方法均基本符合目标编织角 要求,编织角误差控制在5°以内。在编织的前400 mm段,芯轴尺寸发生较大变化,400~700 mm段,目 标编织角发生变化,因此与后半段相比,前半段编织 过程中的误差波动相对稍大。相比较而言,本文算 法的波动更小。在1200~1700 mm段,X. CHI所提 方法出现了一定的小幅波动,而本文方法得到的编 织角较为平稳。两种方法的误差对比如表4所示,总 体而言,使用本文方法计算得到的芯轴牵引轨迹进 行编织,可以获得更小的编织误差。

表4 编织角误差对比 Tab.4 Braid angle error comparison

方法	最大误差/(°)	均方根误差/(°)
本文方法	3.45	1.19
X.CHI所提方法	4.15	1.92

4 结论

本文提出了一种面向环形编织的芯轴牵引轨迹 生成与采样算法。在轨迹生成阶段,考虑了暂态过 程中收敛区长度与夹角的变化,提出了动态编织模 型,提高了牵引轨迹的生成精度。在轨迹采样阶段, 同时考虑轨迹的空间特征和速度特征,使用自适应 采样算法,使采样轨迹尽可能接近原始轨迹,保证最 终的编织精度。试验表明,针对复杂芯轴和非恒定 目标编织角,本文算法具有更小的编织角误差。

参考文献

[1] 窦宏通, 王晓旭, 刘晓东, 等. 三维异型纺织复合材料的预制体织造技术及材料力学性能研究进展[J]. 材料工程, 2023, 51(04): 88-102.

DOU Hongtong, WANG Xiaoxu, LIU Xiaodong, et al. Research progress in preform weaving technology and material mechanical properties of three-dimensional special-shaped textile composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(04): 88-102.

[2] MELENKA G W, CAREY J P. Development of a generalized analytical model for tubular braided-architecture composites [J]. Journal of Composite Materials, 2017, 51(28): 3861-3875.

[3] DU G, POPPER P. Analysis of a circular braiding process for complex shapes [J]. The Journal of The Textile Institute, 1994, 85(3): 316-337.

[4] NA W J, AHN H C, JEON S Y, et al. Prediction of the braid pattern on arbitrary-shaped mandrels using the minimum path condition [J]. Composites science and technology, 2014, 91: 30–37.

[5] VAN RAVENHORST J H, AKKERMAN R. A yarn interaction model for circular braiding [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 81: 254–263.

[6] HANS T, CICHOSZ J, BRAND M, et al. Finite element simulation of the braiding process for arbitrary mandrel

shapes [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 77: 124–132.

[7] HAJRASOULIHA J, NEDOUSHAN R J, SHEIKHZADEH M, et al. Meso-macro numerical modeling of noncircular braided composite parts based on braiding process parameters[J]. Composite Structures, 2019, 224: 111065.

[8] FOULADI A, JAFARI N R. Prediction and optimization of yarn path in braiding of mandrels with flat faces[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(5): 581–592.

[9] MONNOT P, LEVESQUE J, LEBEL L 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.

[10] 吴杰伟, 孙志宏, 郁强, 等. 等覆盖率变径编织方法 [J]. 纺织学报, 2018, 39(04): 54-62.

WU Jiewei, SUN Zhihong, YU Qiang, et al. Variable diameter braiding with constant cover factor [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(04):54-62.

[11] 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.

[12] LI Q, CHI X, JI 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.

[13] GUYADER G, GABOR A, HAMELIN P. Analysis of 2D and 3D circular braiding processes: Modeling the interaction between the process parameters and the preform architecture[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 69: 90-104.

[14] CHI X, LI Q, YAN H, et al. Robot trajectory optimization control of braiding for three-dimensional complex preforms [J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2021, 16:1-14.

[15] HAN J, LEE J, YANG J. Development of a robot OLP system for the continuous motion control of a mandrel in the radial braiding process [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(6): 3109–3117.

[16] 陆利正,何歆,凌海雅,等. 空间曲线的特征识别 与高质量非均匀采样[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2022, 34(01): 18-24.

LU Lizheng, HE Xin, LING Haiya, et al. Feature recognition and high-quality nonuniform sampling for spatial curves [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2022, 34(01): 18-24.

[17] KOBAYASHI S. Differential geometry of curves and surfaces[M]. Heidelberg: Springer, 2019.

[18] 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.