

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.02.016

基于机器视觉的纱线非接触张力控制方法与试验验证

李昊昊¹, 单忠德^{1,2}, 孙启利^{1,2}, 孙正^{1,2}, 王尧尧^{1,2}, 郭子桐^{1,2},
黄浩³, 刘越⁴

(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及控制全国重点实验室,
南京 210016; 3.北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081; 4.南京长江工业技术研究院,南京 211500)

摘要: 为避免传统接触式测量方法导致检测设备与纱线直接接触带来的摩擦损耗,提出了纱线张力非接触式测量方法,设计了基于机器视觉的纱线张力非接触测量系统。使用双目相机检测纱线末端的消耗速度,调控纱线另一端的主动式携纱器的收放速度,使纱线平稳运行,维持纱线张力稳定。研究表明,所设计基于机器视觉的纱线张力非接触式测量系统较常规接触式张力控制方法,控制纱线张力变化幅度降低到 25% 左右,具有较高的精度和可靠性,能实现三维编织纱线张力的主动控制,具有较强的应用潜力。

关键词: 三维织造;非接触式检测;机器视觉;张力控制;复合材料

中图分类号:TS103.7

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2024)02-0334-07

Verification Research on Non-contact Yarn Tension Control Based on Machine Vision

LI Haohao¹, SHAN Zhongde^{1,2}, SUN Qili^{1,2}, SUN Zheng^{1,2}, WANG Yaoyao^{1,2}, GUO Zitong^{1,2},
HUANG Hao³, LIU Yue⁴

(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. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 4. Nanjing Changjiang Industrial Technology Research Institute, Nanjing 211500, China)

Abstract: Since the traditional contact measuring method leads to the direct contact between the testing equipment and yarns and then causes friction loss, a non-contact measuring method is proposed and a non-contact measuring system for yarn tension based on machine vision is designed. Binocular cameras are used to detect the consumption speed of yarn ends. The yarn's retraction and unwind speed are regulated. And the yarn tension is kept stable. Compared with the conventional tension control methods, the yarn tension change amplitude of the non-contact yarn tension measurement system based on machine vision, is decreased to only 25% of the original. This method has high accuracy and reliability, and can achieve active control of 3D braided yarn tension. It holds strong application potential.

Key words: 3D weaving; non-contact measuring; machine vision; tension control; composites

三维编织工艺生产的复合材料已广泛应用于航空、医疗领域及车辆与船舶等众多产品^[1-3],但三维编织装备在工作过程中会产生一些问题。比如,在编织状态下,编织纱线张力会随不同编织路径发

基金项目:江苏省前沿引领技术基础研究专项项目(BK20212007)。

收稿日期:2023-10-18;**修订日期:**2024-02-29

通信作者:单忠德,男,中国工程院院士,博士生导师,E-mail:shanzd@nuaa.edu.cn。

引用格式:李昊昊,单忠德,孙启利,等.基于机器视觉的纱线非接触张力控制方法与试验验证[J].南京航空航天大学学报,2024,56(2):334-340. LI Haohao, SHAN Zhongde, SUN Qili, et al. Verification research on non-contact yarn tension control based on machine vision[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(2):334-340.

生非恒定波动,若纱线张力波动较大,会导致纱线磨损加剧,严重时会产生断裂;若张力过小,则会导致预制体成形松散等质量问题^[4]。因此,在三维编织工艺中,如何控制纱线张力是成形高质量预制体的关键技术^[5]。

为了控制编织过程中的纱线张力的稳定,国内外进行了纱线张力稳定控制研究。现有的张力控制方法以接触式测量法为主^[6],文献[7]开发出一种纱线监测装置,该装置通过接触式张力检测,可实现同时对多束张力异常纱线的精确识别。王晗等^[8]在研究携纱锭子的基础上,建立纱线的动力学方程。扈昕瞳等^[9]建立了编织锭子结构、速度、弹簧数量和纱线张力间的仿真模型,作为纱线张力的调控依据。西安工程大学韩惠民等^[10]系统研究导纱钩处纺纱张力的动态特性,得出了落纱过程中张力变化与钢领板位置的关系,并依据试验结果改善纱线断线率。Tang等^[11]构建一个用来模拟不同气圈高度和纱线长度时环锭纺纱卷绕过程试验平台,测量导纱眼处纱线张力,通过试验数据与理论计算,推导卷绕过程中气圈与张力的关系。

接触式测量直接使用张力传感器与高速运行的纱线接触,实现方式简单快捷,但是也会导致接触的纱线产生起毛现象,从而导致编织件损伤,甚至影响产品整体力学性能^[12]。因此,亟需开展纱线张力控制的非接触式测量方法研究。缪宇轩等^[13]提出一种纱线非接触式测量方法,通过光电传感器判断纱线移动的方向和大小,并获得纱线的振动频率,推导出纱线张力与振动频率间的对应关系,实现纱线张力实时计算。章玉娟等^[14]设计了一种基于光电传感器的纱线非接触式张力检测系统,将纱线张力变化转化为传感器的脉冲信号数量变化,可对张力进行实时检测。此外,在三维编织中,机器视觉的应用研究也有涉及,刘小龙^[15]利用机器视觉检测编织过程中的纤维状态,及时对异常状态纱线做出筛选。赵鹏翔^[16]使用双目相机检测纱线的运动参数,并对检测方法做出改进,实现参数的准确测量。曹飞^[17]提出了一种纱线张力检测方法,通过图像处理检测纱线的弯曲程度,计算出纱线变形后的张力,但是该方法对纱线添加额外外力,对纱线造成了一定损耗。Xu等^[18]通过工业相机检测纱线气圈,拟合出纱线气圈数量与纱线张力的关系,获得纱线张力值,但是编织过程中气圈检测较难,纱线不能稳定形成可检测的气圈。杜悟迪等^[19]针对具有相同运动轨迹的纱线,使用传感器检测、标定张力控制棒的偏角,以标定的偏角为目标改变卷绕速度,维持偏

角,可以实现对多束具有相同轨迹的纱线进行张力控制。

目前已有许多关于纱线张力非接触式检测的研究,大多基于纱线横向振动、气圈等现象测量分析,对检测环境的要求较高。编织过程中,纱线末端的消耗速度较为容易检测,故本文搭建基于检测纱线运动参数的纱线非接触张力控制平台,开展纱线非接触张力控制方法验证研究,扩展纱线张力测量方法,研究纱线张力与速度变化的对应关系,为实现预制体高质量编织成形提供理论和应用参考。

1 非接触式张力控制原理及装置

1.1 非接触式张力控制原理

由于纱线的结构非线性特点,纱线运动所产生的张力不完全服从胡克定律,需要建立准确的纱线运动速度与张力的本构关系。由文献[20]可知,可以使用弹性元件弹簧以及粘性元件粘壶的不同组合方式来描述纱线的力学性能。其中纱线的开尔文模型适用的范围更广,该模型由一个弹簧与一个粘壶并联构成,如图1所示。纱线拉伸时模型中的两个元件应具有相等的应变 ϵ ,总应力 σ 为两个元件应力和,纱线的张力变化可以表示为

$$\Delta T = S\sigma = S \left(E\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt} \right) = ES \frac{\int_{t_1}^{t_2} (v_2 - v_1) dt}{l} + S\eta \frac{(v_2 - v_1)}{l} \quad (1)$$

式中: S 为纱线横截面积, E 为弹性模量, η 为黏滞系数, l 为纱线原长, v_2 、 v_1 分别为纱线两端速度。

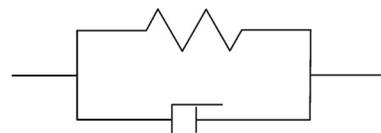


图1 开尔文模型示意图

Fig.1 Kelvin model

基于上述分析,当纱线两端速度维持一致时,即可实现纱线张力稳定控制。设计纱线张力非接触式控制试验平台,具体功能如图2所示。主要组成部分包括上位机、下位机和双目立体视觉系统等。

为了精确测量纱线运动速度,本文搭建双目视觉系统实现运动参数检测。两个相机在不同位置检测空间中同一个点,按照标定的矩阵进行坐标转换,即可实现空间位置测量。假定在某时刻测量得

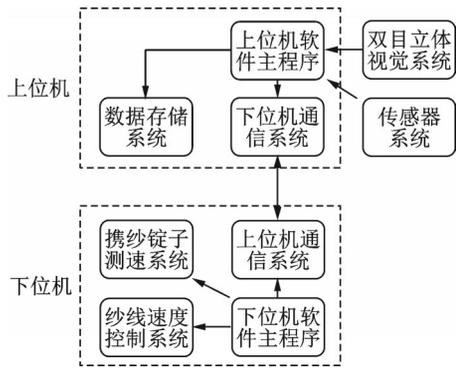


图2 系统结构图

Fig.2 System structure chart

到纱线上待检测的特征点的起始空间坐标,经过较短的时间后测量到下一位置的空间坐标,即可求得该时间段内特征点的位移及瞬时速度。

1.2 张力控制试验平台设计

1.2.1 试验平台搭建

本文的纱线张力控制试验平台主要包括硬件部分与控制系统部分。硬件包括:双目相机、上位机、微处理器、电机驱动、电机、编码器、张力传感器、编织针、XY方向直线模组以及电源等。具体实物如图3所示。编织针作为相机检测的对象,安装在直线模组上模拟编织针多个方向上的运动轨迹,其速度可视为纱线的消耗速度。在试验模拟编织过程中,追踪织造针的特征点位置变化,计算其运动速度,主动控制电机改变携纱器纱线送出、收卷速度、闭环控制纱线张力稳定。在携纱器与直线模组的滑块之间安装张力传感器标定张力与速度差的对应关系、反馈张力控制效果。本试验中编织针可在多个方向上运动,若使用单目相机,则不能准确获取编织针具体的空间坐标,考虑实际需要,本文选择使用双目相机。

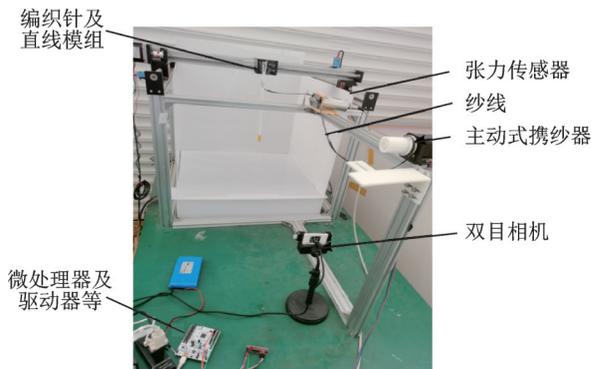


图3 试验平台主要硬件

Fig.3 Main hardware of the experimental platform

1.2.2 图像处理和控制系统

(1) 图像处理步骤

本试验采用角点检测方法检测追踪织造针端

点,在本试验中,编织针形状较为尖锐,便于提取特征点,检测多个角点并遍历每个角点在图像中的位置,以及该角点周边像素变化,即可确定该点是否是编织针端点,实现特征点定位与追踪。经过多次试验,每次程序运行后均能快速定位与追踪织造针位置,具备较高的检测效率。

通过立体匹配算法,定位双目相机所拍摄图片上特征点,实现该像素点的空间坐标计算,作为纱线运动速度检测的前置条件。双目视觉立体匹配大多使用块匹配(Block matching, BM)以及半全局块匹配(Semi-global-block matching, SGBM)算法,两种算法在时间与精度上各有优势。图4是两种不同算法对应的试验特征点深度图。试验采集图像的分辨率为640像素×480像素,在此分辨率下运行BM算法时速度较SGBM算法并无太多提高,但是SGBM算法形成深度图的质量较高,特征点周边无过多噪点,故选择SGBM算法进行试验。以相同间隔设置不同距离的参照物检测测距精度,参照物移动50 mm,测量距离分别为461.89、511.08、560.92 mm,误差在±1 mm之间,在可以接受范围内,具有一定的准确性。

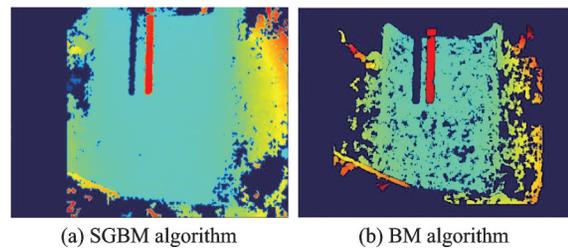


图4 深度图对比

Fig.4 Comparison of depth images

(2) 控制系统设计

在本平台中,双目相机负责检测收集纱线空间位置图像,使用计算机作为上位机,计算纱线运动参数等功能。下位机使用STM32F103RBT 6芯片控制步进电机,电机驱动使用easydriver芯片,微处理器使用串口与上位机之间通信,上位机将目标速度传输至微处理器,并通过编码器获取当前速度,微处理器将目标速度与当前速度比较,通过相应的控制策略及时调节脉冲宽度调制(Pulse width modulation, PWM)波频率,控制携纱器电机转速,实现快速、准确的张力控制。使用施密特TSL-100型号张力传感器对纱线末端张力进行测量,并将张力信号传输至上位机,反馈张力控制效果。张力控制整体流程如图5所示。

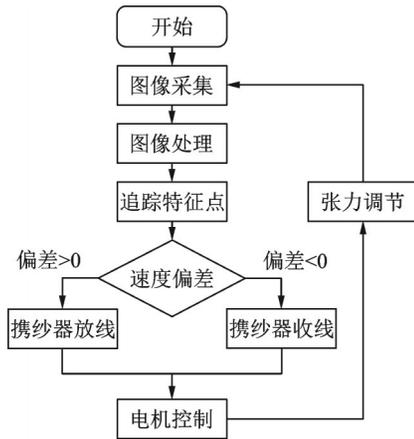


图 5 张力控制流程

Fig.5 Tension control process

2 试验结果

2.1 纱线张力模型

开展纱线张力开尔文模型验证研究,设定直线模组以及主动式携纱器不同的运动速度,速度差分别为 0.25、0.5、0.75 mm/s,记录张力随时间的变化数值,获得不同速度差对应的纱线张力值,如图 6 所示。

对图像数据通过最小二乘法进行线性拟合,拟合式为

$$L_{0.25} = 7.976 \times t \quad (2)$$

$$L_{0.5} = 15.45 \times t \quad (3)$$

$$L_{0.75} = 22.45 \times t \quad (4)$$

拟合优度分别为 0.993、0.997、0.996,由此得到在速度差产生的张力与时间变化成线性关系,因此,开尔文模型符合本试验的检测,可以检测不同速度差对纱线张力的影响。

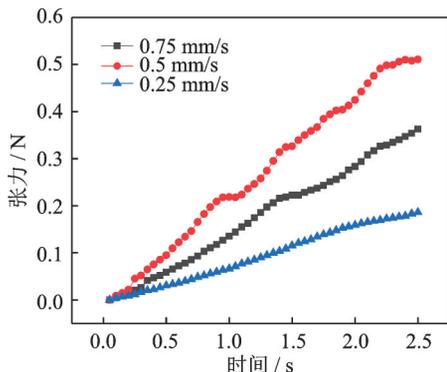


图 6 纱线张力-时间变化

Fig.6 Yarn tension-time variation

假设在纱线匀速运行时速度发生突变,分别使用 T300-6K 碳纱线、尼龙绳、石英纤维 3 种材料,测量在相同时间间隔内主动携纱器速度调节一致后张力稳定值的变化,不同速度变化下多次测量后取

张力变化值的均值,获得速度差与纱线张力的关系如图 7 所示。速度差的变化与张力变化近似为线性关系,可以预测在系统启动或卡顿等时刻纱线张力变化幅度,在纱线两端速度差产生较大突变时,为了避免纱线张力变化,需要调节携纱器收放纱速度、方向,抵消张力变化,使张力维持在预定的区间内。

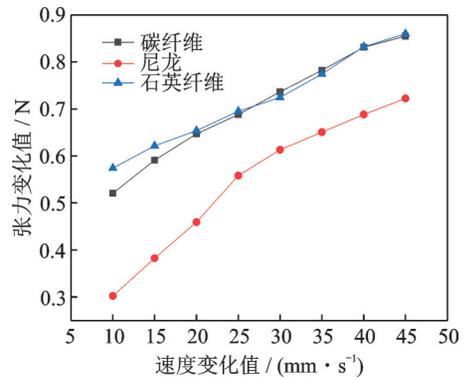


图 7 纱线张力-速度变化

Fig.7 Yarn tension-speed variation

2.2 纱线速度检测精度研究

为了提升非接触张力检测的可信度,需要对双目相机测速精度进行检测,进而验证纱线速度检测效果。设定直线模组在单方向上以不同速度运动,按照相同的时间间隔进行位移检测计算速度,并与实际速度对比,检验速度偏差,获得速度测量值,如图 8 所示。

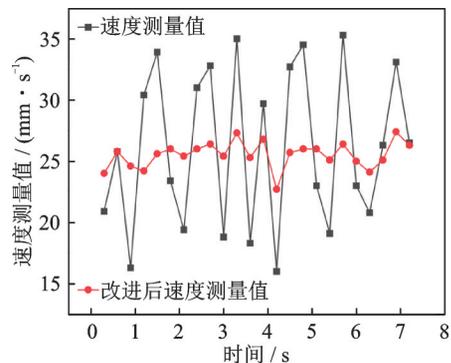


图 8 速度测量值对比

Fig.8 Comparison of speed measurement values

由图 8 可知,在较短的时间内,相邻的几个偏差较大的数据计算均值后与实际运动速度接近,将所有测量数据求和并计算均值,均值为 26.08 mm/s,方差为 40.67,与实际值 25 mm/s 有一定偏差,且速度测量波动较大,不适于后续试验精度的检测。原因可能是:图像拍摄时间间隔过短,双目相机在测距时产生较小的误差会被放大。

为了减小误差,考虑适当增加双目相机采集

图像的时间间隔。基于实验室项目中所设计的某型号装备,该装备在工作过程中为兼顾各个工艺步骤,采用步进式方式运行,每完成一个步骤会有较长时间的停顿,有足够时间对张力进行测量与调控,对纱线张力的实时性要求可适当降低,本试验将检测频率从0.25 s/次变为0.3 s/次,检测频率没有下降过多,且在该时间段内因速度变化引起的张力变化数值较小,可及时调整。经计算,改进后测量速度均值为25.09 mm/s,最终所测量数据的方差从40.67降低为2.91,仅为原先的5%左右,与实际值较为接近且方差较小,综合考虑测量的实时性、准确性、保证系统的可靠性等要求,本文选择了增加相机拍摄间隔等方法。在该速度偏差下,在每次速度测量的间隔内张力不会出现较大的变化幅度,故改进后的方案能在较短的时间内对纱线的速度及时调整,维持张力稳定。

2.3 纱线非接触张力控制效果分析

为了验证本文方法的有效性,需检验纱线张力主动控制效果。本试验环境温度为室温,分别使用T300-6K碳纱线、尼龙绳、石英纤维多种材料进行试验,试验过程中系统直线模组的速度会依据不同位置、运动方向进行改变。在运动系统恒定速度的作用下,获取携纱器稳定运行状态下纱线张力大小与变化范围,结果如图9所示。由图9可知,在不添加主动控制的状态下,不同的纱线(T300-6K碳纤

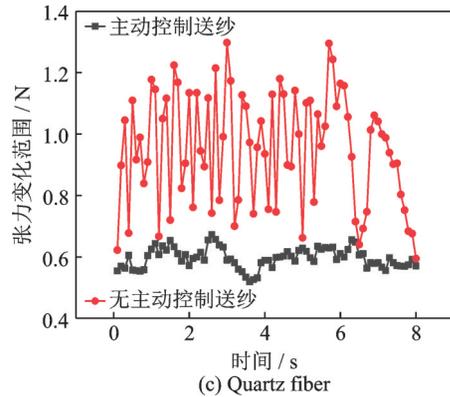


图9 纱线张力变化

Fig.9 Yarn tension variation

维、尼龙纱线、石英纤维纱线)的张力均会维持在一个较高的水平,且张力变化幅度不稳定。据计算,3种不同纱线的均值分别为1.19、0.77、0.96 N,方差为117.59、239.75、331.36,均值与方差如表1所示。该状态下对纱线存在一定的起毛、磨损现象。

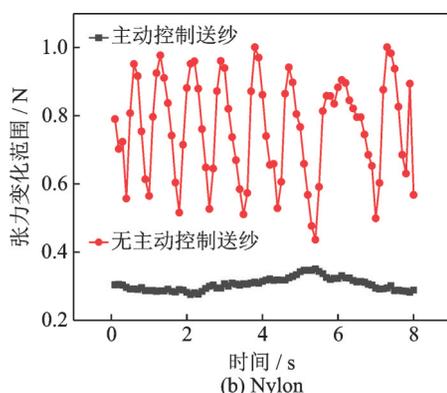
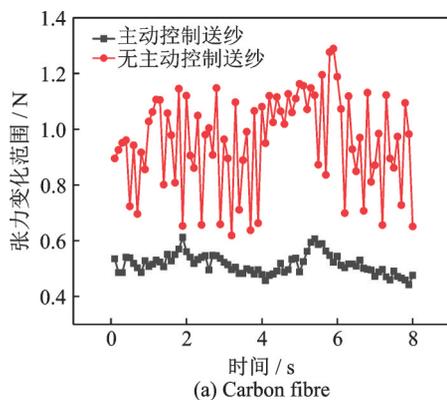
表1 纱线张力均值与方差

Table 1 Mean and variance of yarn tension

材料	未控制时张力均值/N	未控制时方差	主动控制张力均值/N	主动控制方差
碳纤维	1.19	117.59	0.50	3.47
尼龙	0.77	239.75	0.38	3.25
石英纤维	0.96	331.36	0.80	13.56

为了保证速度采集的准确性和时效性,使用视觉检测方法进行纱线张力主动控制,双目相机每隔0.3 s进行一次纱线位置检测并计算速度,以检测速度作为电机控制目标速度,控制携纱器卷绕放线收线控制张力,采集视觉速度检测值与张力传感器张力值等信息。

由图9可知,在模拟纱线织造过程中,添加纱线张力主动控制,张力均值分别在0.50、0.38、0.80 N,方差3.47、3.25、13.56,均值与方差如表1所示。计算不同控制方法下张力变化最大值与最小值的差值,不同材质纱线张力变化范围分别为:0.67、0.17、0.56、0.08、0.70、0.15 N,变化范围最大仅为原先的25%左右,相比没有进行主动控制时张力值显著下降,且张力变化幅度更为稳定。对比试验后碳纤维的磨损状况,有无使用主动控制下的碳纤维状态分别如图10(a,b)所示,由图10可知,使用被动控制时,碳纤维磨损情况较重,多处位置产生破裂,而在使用主动控制时,纱线的磨损状态较不明显,故本文所提出的方法可有效降低张力变化对纱线质量的影响。



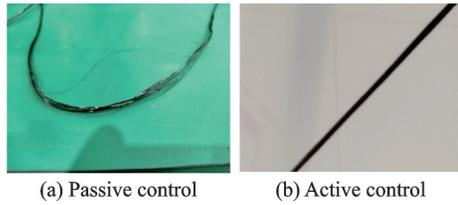


图 10 纱线磨损状态

Fig.10 Yarn wear status

3 结 论

基于复合材料三维编织工艺提出了一种基于机器视觉与控制纱线速度差的张力控制方法,该方法可实现纱线张力非接触式检测,能有效减弱纱线编织过程中的磨损及损耗,具有工程化应用的意义,具体研究结果如下:

(1)设计纱线张力非接触控制试验平台,使用双目相机、微处理器等硬件完成原始图像采集、电机控制等工作,并对图像进行立体匹配等处理实现特征点的追踪,实现纱线消耗速度的检测与主动式携纱器的控制。

(2)基于该平台,开展 3 种纤维(碳纤维、石英纤维、尼龙纤维)的张力值控制稳定性测试研究,研究表明,设定的纱线速度与纱线张力呈现线性变化规律,且均能实现张力的稳定控制。通过对比被动式张力控制装置,该平台测试出的张力变化范围可降低到原先的 25% 左右,张力控制稳定且效果良好。

参考文献:

- [1] 单忠德,刘丰.复合材料预制体数字化三维织造成形[M].北京:机械工业出版社,2019.
SHAN Zhongde,LIU Feng. Composites preforms digital 3-dimensional woven forming[M]. Beijing: China Machine Press,2019.
- [2] 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,2022,44(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, 44(5): 889-898.
- [3] 任晓华.航空复合材料制造技术发展[J].航空科学技术,2010(4): 2-5.
REN Xiaohua. Composite material forming technology development[J]. Aeronautical Science and Technology, 2010(4): 2-5.
- [4] 熊秋元,高晓平.纱线张力检测与控制技术的研究现状与展望[J].棉纺织技术,2011,39(6): 65-68.
XIONG Qiuyuan, GAO Xiaoping. Current situation and outlook of yarn tension measurement and control technology[J]. Cotton Textile Technology, 2011, 39(6): 65-68.
- [5] 李潭,顾轶卓,王绍凯,等.碳纤维丝束起毛量测试方法[J].材料工程,2017,45(7): 84-90.
LI Tan, GU Yizhuo, WANG Shaokai, et al. Measuring method for fuzz mass of carbon fiber tow[J]. Journal of Materials Engineering, 2017,45(7): 84-90.
- [6] 庾在海,吴文英,陈瑞琪.纺织过程中的纱线张力测试方法[J].传感器世界,2004(1): 27-29.
YU Zaihai, WU Wenying, CHEN Ruiqi. Measurements of yarn tension in textile process[J]. Sensor World, 2004(1): 27-29.
- [7] GRAF N, BONGRATZ R. Device for determining the yarn tension of a single yarn in a yarn sheet in textile processing: DE:EP1640485A2[P]. 2006-03-29.
- [8] 王晗,孟焯,孙以泽,等.碳纤维编织机携纱锭子编织过程纱线张力分析[J].毛纺科技,2017,45(12): 61-65.
WANG Han, MENG Zhuo, SUN Yize, et al. Analysis of yarn tension in the braiding process of yarn carrier of carbon fiber braiding machine[J]. Wool Textile Journal, 2017,45(12): 61-65.
- [9] 扈昕瞳,张玉井,孟焯,等.编织锭子放线速度对纱线张力调控的建模与影响[J].纺织学报,2017,38(6): 111-117.
HU Xintong, ZHANG Yujing, MENG Zhuo, et al. Modeling and influence about speed of released-yarn in braiding spindles on yarn tension[J]. Journal of Textile Research, 2017,38(6): 111-117.
- [10] 韩惠民,沈艳琴,韩玲.导纱钩处纺纱张力动态分析[J].纺织科技进展,2007(5): 10-11.
HAN Huimin, SHEN Yanqin, HAN Ling. Investigation on the dynamic characteristic of yarn tension at guider[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2007(5): 10-11.
- [11] TANG Z X, WANG X G, BARRIE F, et al. An experimental investigation of yarn tension in simulated ring spinning[J]. Fibers and Polymers, 2004, 5(4): 275-279.
- [12] 刘行,缪旭红,赵帅权.纱线张力测试方法研究进展[J].棉纺织技术,2015,43(1): 78-82.
LIU Xing, MIAO Xuhong, ZHAO Shuaiquan. Research progress of yarn tension test method[J]. Cotton Textile Technology, 2015,43(1): 78-82.
- [13] 缪宇轩,孟祥益,夏港东,等.非接触式纱线张力监测系统的研制与开发[J].毛纺科技,2020,48(5): 71-76.
MIAO Yuxuan, MENG Xiangyi, XIA Gangdong, et al. Research and development of non-contact yarn tension

- monitoring system[J]. Wool Textile Journal, 2020, 48(5): 71-76.
- [14] 章钰娟,彭来湖,徐郁山,等.非接触式纱线状态检测技术研究[J].现代纺织技术,2022,30(1): 101-108.
ZHANG Yujuan, PENG Laihu, XU Yushan, et al. Research on non-contact yarn state detection technology [J]. Advanced Textile Technology, 2022, 30(1): 101-108.
- [15] 刘小龙. 编织过程纤维状态的机器视觉检测研究与应用[D].上海:东华大学,2023.
LIU Xiaolong. Research and application of machine vision inspection of fiber state in braiding process[D]. Shanghai: Donghua University, 2023.
- [16] 赵鹏翔. 基于机器视觉的纱线运动参数识别[D].上海:东华大学,2023.
ZHAO Pengxiang. Motion parameters identification of yarn based on machine vision[D]. Shanghai: Donghua University, 2023.
- [17] 曹飞. 基于图像处理的纱线检测系统[D].武汉:武汉理工大学,2009.
CAO Fei. The detection system of yarn based on digital image processing technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [18] XU Q, MEI S Q, ZHANG Z M. Measurement method of yarn tension based on CCD technology[J]. Advanced Materials Research, 2011, 230/231/232: 89-93.
- [19] 杜悟迪,刘丰,单忠德,等.基于机器视觉的三维织造张力控制方法[J].工程塑料应用,2020,48(8): 61-65,70.
DU Wudi, LIU Feng, SHAN Zhongde, et al. Three-dimensional weaving tension control method based on machine vision[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8): 61-65, 70.
- [20] 马勋勋. 纱线动力学若干问题研究[D].上海:东华大学,2022.
MA Xunxun. Research on several typical problems of yarn dynamics[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.

(编辑:陈珺)