

基于柔弹性线材姿态轨迹的成结机构设计与实验

许明三, 陈培杰, 江吉彬, 叶建华, 唐映林, 林俊杰

(福建理工大学机械与汽车工程学院, 福建福州 350118)

摘要: 针对柔弹性复合线材由于弯曲刚度过小导致结口塌陷和存在的弹性变形影响成结效果的问题, 提出了一种基于成结线材动作轨迹建模的随动型成结机构设计方法。通过运动轨迹模型结合线材物理特性试验进行设计参数匹配后开展了线材实机成结实验。实验结果表明, 所提的设计方法可以为该线材成结过程提供支撑与约束, 并有效控制成结后成品的尾端长度, 同时达到每件 3.8 s 的加工效率, 能够满足实际生产需求。

关键词: 柔性线材; 成结装备; 单结; 运动轨迹模型

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)01-0067-07

Design and experiment of knotting mechanism based on flexible elastic wire attitude trajectory

XU Mingsan, CHEN Peijie, JIANG Jibin, YE Jianhua, TANG Yinglin, LIN Junjie

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Aiming to address the issue of knot collapse and elastic deformation caused by insufficient bending stiffness of flexible elastic wires, which affect the knotting effect, a follow-up knotting mechanism design method based on motion trajectory modeling of wire knotting is proposed. Combined with the wire physical characteristics test, the design parameters were matched through the motion trajectory model. Practical knotting experiments were then carried out. Results demonstrate that the proposed design method can provide support and constraints for the wire knotting process, effectively control the tail length of finished knots while achieving a production efficiency of 3.8 s every piece, which meets the requirements of practical production needs.

Keywords: flexible wire; knotting equipment; single knots; motion trajectory model

自 2015 年以来, 中国打结机配件产业获得了强劲的发展动力。截至 2023 年, 中国已占据该产品全球总市场份额的 65%, 出口额达到了 42 亿元^[1]。在此背景下, 加速高精度、高效率智能化装备的研发, 对于巩固产业优势、提升国产装备的核心竞争力具有重要意义。目前, 针对绳结结构设计及其自动化成结加工工艺, 国内外学者已开展了广泛而深入的研究。

在成结原理的分析研究中, Wang W 等^[2-3]提出了一种用以固定和排列任意绳结的方法, 通过几何重构来简化打结和解结流程的途径。

陈君荣等^[4]通过分析成结过程中的交叉点个数和极值点个数的变化规律揭示了绳带拓扑结构与几何形态的演变特征, 并以此作为组合指标, 实现了绳带在成结过程中的形态控制。吴昊等^[5]采用质点弹簧系统 (mass spring system, MSS) 方法建模, 并结合物体非线性及弯曲特性对其进行受力分析, 提出了一种基于层次包围球的模拟受力方法解决缝合线成结过程中的自碰撞检测与响应。

成结加工中使用的线材根据材质特性可分为硬质无弹性的刚性线材和软质高弹性的柔性线

收稿日期: 2025-02-27

基金项目: 福建省科技计划创新资金项目 (2023C0023)

第一作者简介: 许明三 (1974—), 男, 福建仙游人, 教授, 硕士, 研究方向: 智能装备制造。

材,二者在成结机理、运动轨迹及工艺难度上呈现显著差异。林晶等^[6]开发的瓦楞纸自动捆扎设备通过确定纸板推送位置实现了低刚性塑料绳的高效捆扎。黄桂芳等^[7]基于仿生学原理设计的海带打结机通过多机构的协同动作保证打结加工过程的顺利进行,提高了打结效率。白茂东等^[8]进一步地提出双条平结协同策略,将单条海带成环动作转化为双条伸缩运动,使打结成功率提高 23.6%,有效解决了单环结构不稳定性问题。在柔性线材成结技术研究中,谭嗣宇等^[9]通过对鸟嘴机构的变式改造,使其能够适应黄麻纱线的成结加工。然而由于传统鸟嘴机构形状曲线过于光滑,其在柔性线材的成结过程中易出现线材脱钩等失败现象。

然而,目前针对柔弹性复合线材的结口支撑以及成结后绳结的尾端长度控制问题,鲜有涉及。为此,本课题拟在考虑复合线材拉伸特性的基础上,利用线材运动轨迹模型计算绳结形成后的尾端长度,并据此指导带结口支撑作用的共侧式成结机构的尺寸参数设计,最后通过自动化成结实验验证设计方法。

1 线材成结姿态分析与运动轨迹模型构建

1.1 线材成结姿态分析

用于自动化生产的细网面料与弹性边绳复合线材,需要经过编织、裁剪和缠绕成捆等工艺流程制得。物料本体主要由两侧弹性边绳和中部细网组成,如图 1 所示。

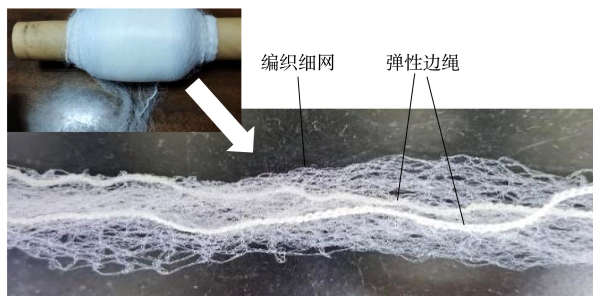


图 1 物料结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of material structure

为满足产品的高效加工生产,选择绳结形式为单结,其具有结构简单、可快速成结和有效防止

绳结滑脱的优点。单结加工过程为:裁取相应长度的物料,如图 2(a)所示;将物料缠绕形成结口,如图 2(b)所示;后将线材穿入结口中,如图 2(c)所示;随后拉紧成结,如图 2(d)所示。经过多次试验,对比成结前后线材长度变化,可得线材拉伸直径为 0.9 mm,绳结形成所需线材长度平均为 33.71 mm。

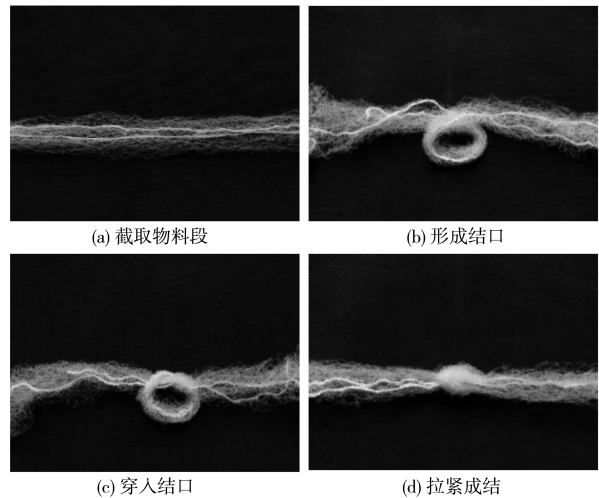


图 2 成结过程

Fig.2 Knotting process

从图 2(b)可见,复合线材的细网面料在无外力作用时呈现凌乱分散的状态,一定程度上将会影响自动化成结机构引导线头穿入结口。为避免线材遭受运动部件的强力破坏并保障成结作业的顺利完成,需要在成结过程中对细网结构进行约束并对结口形状提供支撑。

1.2 绕线运动轨迹模型

在对结口形成提供支撑的运动部件设计过程中发现,影响成结效果的关键因素为线材直径 d 以及绕线轴套直径 D 。根据运动合成与分解理论,可将成结过程中的线材轨迹分为轴套缠绕曲线、固定段直线、交叠曲线、衔接曲线以及穿过结口后的尾端游离段直线 5 部分,如图 3 所示。以线材与绕线轴套接触的第一个点(初始点)所对应的轴心位置做为原点,建立笛卡尔直角坐标系,对上述 5 部分逐一进行轨迹建模。引入进度参数 $t_i \in (0, 1)$ 表征第 i 段轨迹曲线由已知点朝向相邻曲线前进的运动进度。

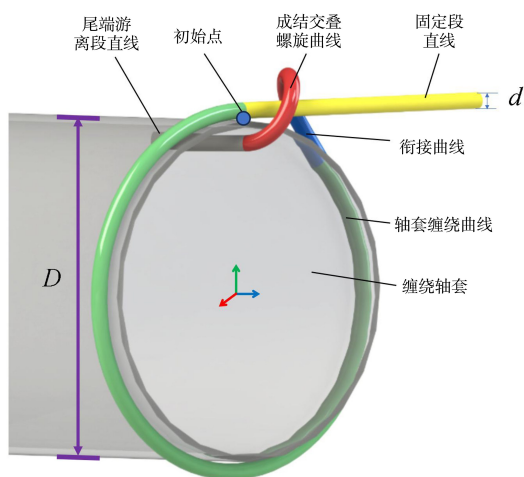


图 3 成结坐标系建立与线材运动轨迹示意图

Fig.3 Schematic diagram of knot coordinate system establishment and wire motion trajectory

1.2.1 轴套缠绕曲线

轴套缠绕曲线可以看做线材以绕线轴套为缠绕对象的绕轴旋转运动轨迹。由该段轨迹的起点坐标 $(D/2+d/2, 0, 0)$ 以及绕线轴套的直径、线材的直径尺寸可得,绕线轴套的螺旋线旋转半径为 $r_0 = D/2+d/2$ 。随着 t_1 的增加,曲线在 Z 轴的位移量逐步增加,具体形式为螺旋前进。由此可得轴套缠绕曲线的轨迹方程组表达式为:

$$\begin{cases} x(t_1) = (D/2+d/2) \cos(\omega_1 t_1) \\ y(t_1) = (D/2+d/2) \sin(\omega_1 t_1) \\ z(t_1) = u_1 t_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_1 为螺旋线角速度,其决定了轴套缠绕曲线随 t_1 运动时在 XOY 平面中的相位变化速度。 u_1 为曲线在 Z 轴的前进速度,当 $u_1 > 0$ 时,螺旋线前进方向为 Z 轴正方向,反之则为 Z 轴负方向。

1.2.2 固定段直线

由于固定段直线与轴套缠绕曲线在二者相接点 $(D/2+d/2, 0, 0)$ 处相切,在该点的切向量为 $\vec{v}_1 = (0, -\omega_1(D/2+d/2), -u_1)$,因此固定端直线轨迹方程组表达式为:

$$\begin{cases} x(t_2) = D/2+d/2 \\ y(t_2) = (-\omega_1(D/2+d/2))t_2 \\ z(t_2) = -u_1 t_2 \end{cases} \quad (2)$$

1.2.3 成结交叠螺旋曲线

成结交叠螺旋曲线是以固定段直线为缠绕对象,而固定段直线的空间状态与坐标轴并不存在平行或垂直的关系,因此采用间接求解方法。固

定段直线绕 X 轴旋转至与 Y 轴重合,求解螺旋线方程后通过坐标旋转变换得到成结交叠螺旋曲线方程。成结交叠螺旋曲线起点与终点相位差为 270° ,即轨迹运动角速度 $\omega_2 = 1.5\pi$ 。则成结交叠螺旋曲线轨迹方程组表达式为:

$$\begin{cases} x(t_3) = -(d/2) \cos(1.5\pi t_3) + a \\ y(t_3) = u_2 \cos(\theta) t_3 - (d/2) \sin(\theta) \sin(1.5\pi t_3) \\ z(t_3) = u_2 \sin(\theta) t_3 + (d/2) \cos(\theta) \sin(1.5\pi t_3) \end{cases} \quad (3)$$

式中, a 为常数,其值为 $a = D/2+d/2$, θ 为固定段直线与 Y 轴负半轴之间的夹角,其值为 $\theta = \pi/2 - \tan^{-1}[-\omega_1(D/2+d/2)]$, u_2 为成结交叠螺旋曲线螺旋升率系数。

1.2.4 衔接曲线

由于成结交叠螺旋曲线与轴套缠绕曲线之间平滑过渡,因此两曲线在此处的切向量共线,即两切向量叉积为零向量。三次贝塞尔曲线是一种常用的曲线表示方法,尤其适用于在给定起点、终点和其切向量的情况下进行曲线与曲线之间的平滑过渡^[10]。三次贝塞尔曲线的方程为:

$$P(t) = (1-t)^3 P_0 + 3(1-t)^2 t P_1 + 3(1-t) t^2 P_2 + t^3 P_3 \quad (4)$$

式中, P_0 为曲线的起点; P_3 为曲线的终点; P_1 、 P_2 为曲线的控制点且分别满足 $P_1 = P_0 + \lambda T_0$ 、 $P_2 = P_3 + \beta T_1$,其中 λ 与 β 分别为曲线平滑度系数。曲线形状由起点 P_0 、起点切向量 T_0 与终点 P_3 、终点切向量 T_1 控制。

将起点与终点坐标及其所在位置的切向量分别代入三次贝塞尔曲线方程中可得衔接曲线轨迹方程组表达式为:

$$\begin{cases} x(t_4) = (1-t_4)^3 a \cos(\omega_1) + 3(1-t_4)^2 t_4 [a \cos(\omega_1) + \lambda(-a\omega_1 \sin(\omega_1))] + 3(1-t_4) t_4^2 [a - \beta(1.5\pi d)] \\ y(t_4) = (1-t_4)^3 a \sin(\omega_1) + 3(1-t_4)^2 t_4 [a \sin(\omega_1) + \lambda(a\omega_1 \cos(\omega_1))] + 3(1-t_4) t_4^2 [u_2 \cos(\theta) + d \sin(\theta)] - \beta[u_2 \cos(\theta)] + t_4^3 [u_2 \cos(\theta) + d \sin(\theta)] \\ z(t_4) = (1-t_4)^3 (u_1) + 3(1-t_4)^2 t_4 (u_1 + u_1 \lambda) - 3(1-t_4) t_4^2 [u_2 \sin(\theta) + d \cos(\theta)] - \beta[u_2 \sin(\theta)] - t_4^3 [u_2 \sin(\theta) - d \cos(\theta)] \end{cases} \quad (5)$$

1.2.5 尾端游离段直线

线材穿入结口后的尾端游离段直线轨迹起点位于成结交叠螺旋曲线的终点,由此可以确定尾端游离段直线线上一点。此处切向量可由成结交叠螺旋曲线方程对该点求导并将坐标值代入计算得出。故穿过结口后的尾端游离段直线轨迹方程组表达式为:

$$\begin{cases} x(t_5) = a - 1.5\pi dt_5 \\ y(t_5) = u_2 \cos(\theta) + d \sin(\theta) + u_2 \cos(\theta) t_5 \\ z(t_5) = u_2 \sin(\theta) - d \cos(\theta) + u_2 \sin(\theta) t_5 \end{cases} \quad (6)$$

根据以上成结过程中线材运动轨迹模型,通过式(7)即可计算在绳结形成时所参与成结的线材长度。

$$L = \int_a^b \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt \quad (7)$$

绳结随绕线轴套直径的减小而逐渐拉紧形成,经过对线材各段运动轨迹的长度计算,发现轴套缠绕曲线在绳结拉紧过程中大部分将会转化为尾端长度,因此在成结过程中轴套缠绕曲线长度对绳结形成后尾端长度具有决定作用的关键影响。根据以上线材运动轨迹模型可得,只有固定段直线与轴套缠绕曲线两段轨迹的长度与虚拟轴套直径 D 有关,而衔接曲线、成结交叠螺旋曲线与尾端直线 3 段轨迹的长度只与线材直径 d 有关。因此在线材直径 d 确定的情况下,线材绕线长度由虚拟轴套直径 D 决定。经由线材成结姿态分析得出线材拉伸直径为 0.9 mm,将其代入式(3)、式(5)、式(6)、式(7)计算可得衔接曲线、成结交叠螺旋曲线与尾端直线 3 段轨迹长度分别为 2.00、5.33、3.00 mm。将绳结形成所需线材的平均长度 33.71 mm 减去上述 3 段轨迹之和后即得固定段直线与轴套缠绕曲线两段轨迹的长度。代入式(1)、式(2)、式(7)计算后可得,虚拟轴套直径 $D \approx 10$ mm。

2 成结工艺机构设计与实验

2.1 线材特性试验

由于细网面料与弹性边绳复合线材具有的一定弹性,使得在成结过程中会出现拉伸变形导致长度出现动态变化,因此进行自动化成结机构设计之前,需要测定物料线材的弹性系数作为线材长度计算的补充。

2.1.1 弹性拉伸试验

物料两侧弹性边绳在加工过程中,通过外部施加拉力,可以将物料整体从松散状态变为绷直状态,从而便于加工。取一段线材,固定其中一端,在 100 mm 处做上标记后,拉伸另一端,施加拉力直至物料处于绷直状态无法继续伸长,观察线材拉伸前后标记位移情况。测量过程如图 4 所示,图 4(a) 为物料未受外部施加力的长度示意图,图 4(b) 为在施加拉力后的物料状态。

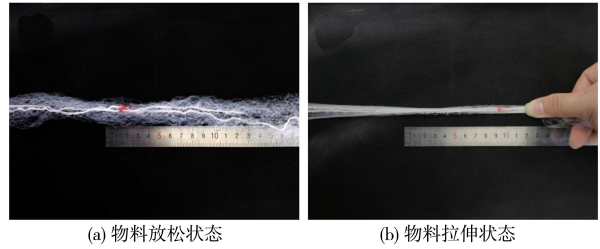


图 4 物料拉伸长度测量

Fig.4 Measurement of material tensile length

经过测量,物料线材在绷直后的最小直径值为 4.1 mm,极限夹持状态下的最小直径值为 0.9 mm。物料的拉伸长度变化如表 1 所示。

表 1 物料拉伸变化表

Tab.1 Tensile change table of materials

测量次数	拉伸力/N	线材拉伸变形量/mm
1	0.5	78.3
2	0.6	79.7
3	0.5	77.9
4	1.3	80.2
5	0.6	79.9

由表 1 物料绷直状态与松散状态下的长度比较中可知,线材拉伸变形量平均为 79.2 mm。根据式(8)、式(9)可得该线材的拉伸系数为 $\varepsilon = 0.792$ 。

$$\Delta L = L_f - L_0 \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (9)$$

式中, ΔL 为线材受拉变形量, L_f 为线材受拉后长度, L_0 为线材原长度。 ε 为线材拉伸系数。

2.1.2 绳结拉紧力试验

成结过程中,线头进入结口后,要使绳结逐渐缩小并拉紧,那么拉紧力也需要相应地增大。因此,在研究过程中,需要测量致使绳结达到最小间

隙的最大拉紧力。使用手持数显式拉力计 KJ-500 测量实际拉紧力,拉紧力与绳结处最大径向尺寸对照表如表 2 所示。

表 2 拉紧力与绳结处最大径向尺寸表

Tab.2 Table of knot tension force and maximum radial dimensions

测量次数	拉紧力/N	绳结处最大径向尺寸/mm
1	4.5	3.4
2	4.8	3.2
3	5.0	2.9
4	5.5	2.8
5	5.8	2.8

随着拉力的增大,绳结处的最大径向尺寸逐渐减小,且减小的幅度越来越小,当拉紧力增加到一定值后,绳结处的最大径向尺寸就不再降低,因此选择绳结处的最大径向尺寸不再增加时的拉紧力作为所需拉紧力。即表 2 中的拉紧力取所需拉紧力为 5.5 N,绳结处最小径向尺寸为 2.8 mm,表示要使绳结能够顺利拉紧,线材运动空间圆周直径需大于 2.8 mm。

2.2 共侧式成结机构设计

根据以上针对线材成结过程中计算及测量的相关参数指导成结机构设计,从而验证理论计算方法可行性与准确性。

在成结机构的设计上,根据动作的集成化设计原则,减少机构的复杂程度从而避免破坏物料。为了优化设备整体体积,提升空间利用率,同时为

了在不影响原本功能实现的基础上,提升设备加工效率,成结机构采用共侧式双头式成结设计。

共侧式双头机构布置能够将运动部件的动作轨迹集中于固定式拉紧夹爪一侧,在完成加工后的成品可通过另一侧进行快速收料,从而解决物料线材重量较轻、加工结束后不能自然掉落的问题。共侧式成结机构部件组成如图 5 所示,固定式拉紧夹爪用以固定线材一端;绕线夹爪接取线材另一端后通过后方转动轴带动旋转,按照空间凸轮的轨迹将线材缠绕至绕线轴套后经引导杆的牵引,将线材交予伸缩式拉紧夹爪;伸缩式拉紧夹爪在后方拉紧气缸的作用下配合固定式拉紧夹爪形成绳结。

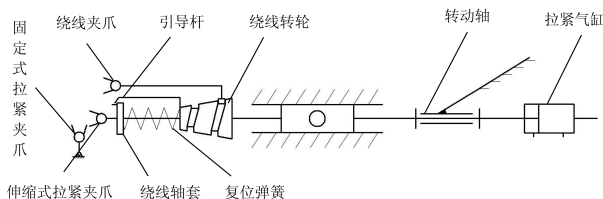


图 5 共侧式成结机构部件组成

Fig.5 Components of co-lateral knotting mechanism

共侧式成结机构工作原理如图 6 所示。裁剪后的待加工线材段分为两端,一端由移料机构交至固定式拉紧夹爪,另一端通过引导杆中腔进入后与绕线夹爪交接。线材被自然区分为两段,第一段自固定式拉紧夹爪出发至接触到绕线轴套处一段,称为固定段,第二段由接触到绕线轴套处至绕线夹爪接取的线头的另一端,称为游离段,如图 6(a)所示。

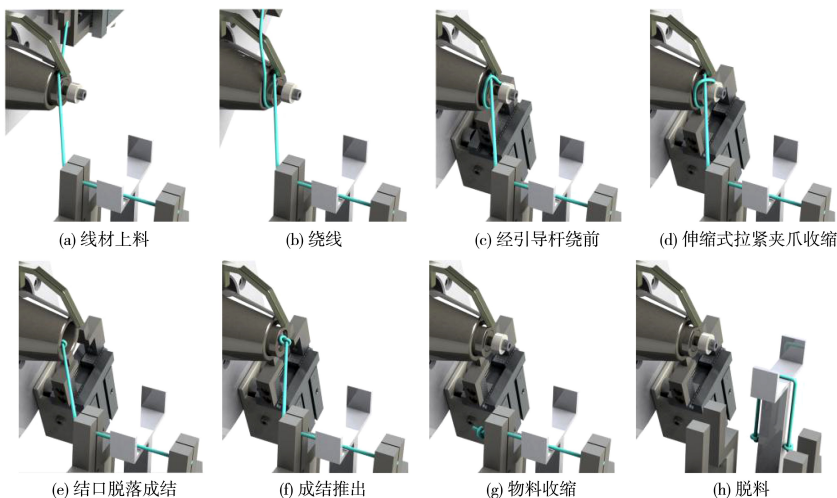


图 6 成结过程示意图

Fig.6 Schematic diagram of knotting process

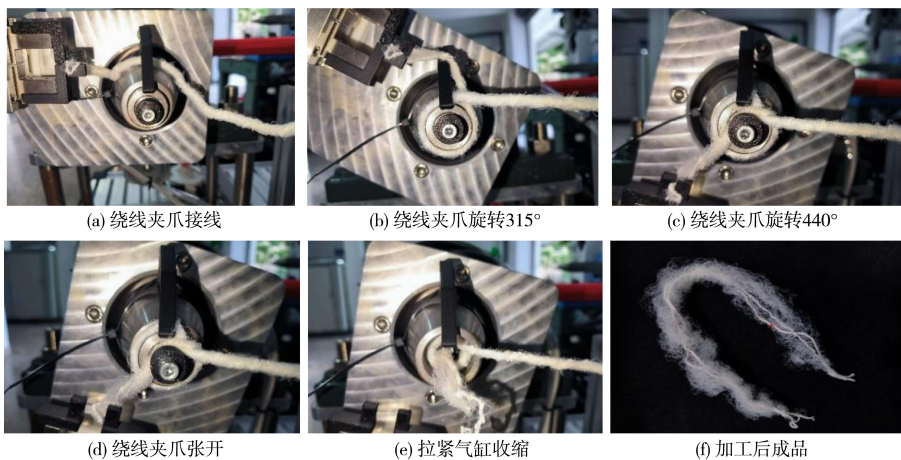


图9 成结过程

Fig.9 Knotting process

在实机运行过程中,随着滑台模组的加速度和气源压力的增大,加工节奏逐步加快。当首次成结时间缩短至平均单次 3.8 s 时,设备依然可以实现良好的加工运行性能。加工期间纱网处于绷紧状态可以最大程度上避免破坏,并且在引导杆的牵制在顺利进入伸缩式拉紧夹爪实现绳结的加工,在加工后呈现良好的绳结尾端长度控制效果,使得总体绳结尾端长度平均为 9.58 mm。

3 结论

1) 经过对线材各段运动轨迹的长度计算,得

出在成结过程中对绳结形成后尾端长度具有决定作用的关键影响因素为轴套缠绕曲线长度。

2) 通过线材运动轨迹模型结合弹性拉伸试验对成结过程中线材长度实现了较为精确控制,解决了复合线材受拉伸回弹影响成结效果的问题

3) 成结机构共侧式设计通过随动型绕线轴套的作用下,线材得以形成完整结口,解决了柔性线材在成结过程中的结口塌陷问题。

4) 经过样机实验,该设计方法在实际使用过程中的加工效率可达每件 3.8 s,绳结尾端长度平均为 9.58 mm,符合实际加工需求。

参考文献:

- [1] 北京博研智尚信息咨询有限公司. 中国打结机配件行业市场规模及投资前景预测分析报告[EB/OL]. (2024-11-09)[2024-12-04]. <https://www.docin.com/p-4763660302.html>.
- [2] WANG W F, BALKCOM D. Grasping and folding knots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm: IEEE, 2016:3647-3654.
- [3] WANG W F, BALKCOM D. Knot grasping, folding, and re-grasping[J]. The International Journal of Robotics Research, 2018, 37(2/3): 378-399.
- [4] CHEN J R, HANG L B, CHEN Y Z, et al. Research on a new knotting device based on knot theory[C]//3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE), 2019. Xiamen: IEEE, 2020: 872-875.
- [5] 吴昊,张峰峰,詹蔚,等. 虚拟手术缝合线实时打结仿真研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(3): 331-335, 359.
- [6] 林晶,陈鼎,李超鹏,等. 瓦楞纸板垛的自动绕绳打结机设计及试验[J]. 包装工程, 2020, 41(1): 82-87.
- [7] 黄桂芳,林建伟,魏观渊,等. 海带打结机的成结机构及其控制系统设计[J]. 渔业研究, 2023, 45(6): 585-592.
- [8] 白茂东,杨继新,王学俊,等. 平结式双条海带打结新方法[J]. 大连工业大学学报, 2017, 36(4): 300-303.
- [9] 谭嗣宇,裴泽光. 黄麻纱线自动打结器的设计[J]. 棉纺织技术, 2025, 53(9): 40-46.
- [10] 江浩,彭侠夫. 基于三次贝塞尔曲线的轨迹规划方法[J]. 数字技术与应用, 2022, 40(11): 7-10.

(责任编辑:方素华)