

螺旋运动式自动割胶装置设计与试验

张喜瑞^{1,2} 温振拓^{1,2} 张志富¹ 孙泽瑾¹ 张恒^{1,2} 刘俊孝^{1,2}
(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 海南大学三亚南繁研究院, 三亚 572025)

摘要: 针对人工割胶劳动强度大,工作效率低,人工成本高且胶工紧缺等问题,设计了一种螺旋运动式自动割胶装置。通过分析割胶轨迹与割胶刀作业状态下的受力情况,获得螺旋化轨迹方程,设计仿割胶轨迹螺旋轨道与齿轨;利用 ADAMS 软件对 3 种不同齿形的传动轴与螺旋齿轨的传动稳定性进行仿真分析,确定螺旋传动机构的结构和工作参数,基于柔性连接方式设计贴树仿形割胶机构。以传动轴转速、耗皮厚度与橡胶树直径为试验因素,以割胶深度和剖面平滑度合格率为试验指标,进行正交试验。结果表明:割胶装置在传动轴转速 12.00 r/min 时,对不同直径橡胶树具有最优的割胶效果,其割胶深度平均合格率为 89.60%,剖面平滑度平均合格率为 91.19%;其中,对直径为 200 mm 的橡胶树进行耗皮厚度 2 mm 的割胶作业时割胶效果最佳,其割胶深度平均合格率达到 93.93%,剖面平滑度平均合格率达到 94.32%,满足割胶作业要求。

关键词: 天然橡胶; 自动割胶; 螺旋运动; 装置设计

中图分类号: S225.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)03-0169-11 OSID: 

Design and Test of Automatic Rubber-tapping Device with Spiral Movement

ZHANG Xirui^{1,2} WEN Zhentuo^{1,2} ZHANG Zhifu¹ SUN Zejin¹ ZHANG Heng^{1,2} LIU Junxiao^{1,2}
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China
2. Sanya Nanfan Research Institute, Hainan University, Sanya 572025, China)

Abstract: Tapping is the key to obtaining natural rubber. Manual rubber tapping is usually encountered in harsh environments, high labor intensity, low efficiency, and a shortage of rubber tapping workers. An automatic rubber-tapping device with spiral movement was designed to solve these problems. Based on theoretical analysis of the tapping track and force analysis of the tapping knife in working, the equation of spiral trajectory was obtained, and the spiral track and gear rail were designed. Then the ADAMS software was used to simulate and analyze the transmission stability of three different gear shapes in the drive shaft and spiral gear rail, and the structure and working parameters of the spiral transmission mechanism were determined. On the strength of the flexible connection method, the pasting and profiling rubber-tapping mechanism was designed. The prototype was tuilt, and an orthogonal test was taken with the factors of transmission shaft speed, tapping thickness, and rubber tree diameter under the indexes of qualification rate of the rubber tapping depth and the tapping surface smoothness. The results showed that the rubber-tapping device had the best tapping performance with a transmission shaft speed of 12.00 r/min. While the average qualified rate of the tapping depth was 89.60%, and the average qualification rate of the tapping surface smoothness was 91.19%. Among them, the 200 mm diameter rubber trees were the best for rubber tapping with a thickness of 2 mm. The average qualification rate of the tapping depth and the tapping surface smoothness were 93.93% and 94.32% under these best parameters, meeting the requirements of tapping work, which can provide a reference for further research of mechanized and automatic rubber tapping devices.

Key words: natural rubber; automatic rubber tapping; spiral movement; device design

收稿日期: 2022-11-23 修回日期: 2023-01-07
基金项目: 海南省重点研发计划项目(ZDYF2021XDNY198)、海南省院士创新平台科研专项(YSPPTZX202109、YSPPTZX202008)、海南省自然科学基金青年基金项目(520QN233)、国家现代农业产业技术体系项目(CARS-33-JX2)和海南省高等学校科学研究项目(Hnky2022-9)
作者简介: 张喜瑞(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备与农业机器人研究,E-mail: zhangxirui_999@sina.com
通信作者: 刘俊孝(1992—),男,讲师,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: 995229@hainanu.edu.cn

0 引言

天然橡胶作为现代社会四大工业原料之一,具有良好的耐磨性、抗冲击性、弹性及散热性,尤其在低温条件下具有合成橡胶无法比拟的延展性与回弹性^[1-2],是关系国计民生的重要战略物资。目前主要采用人工切割橡胶树树皮的方式获取天然橡胶。由于橡胶树独特的产胶特性以及橡胶树干水囊皮层在割胶作业中极易受损等原因,胶工需在凌晨3点前进入胶园工作,且割胶作业对工人的操作技术要求严格,不仅劳动强度大,且工作效率低,导致割胶人工成本居高不下,可占天然橡胶全周期生产成本的70%^[3]以上,且胶工收入低微,难以吸引年轻人加入割胶行业,“胶工荒”问题日益突出。同时,由于天然橡胶价格持续低迷,胶园弃割、弃管、改种等现象日益增多,已严重危害到我国天然橡胶产业的健康发展。因此,发展机械化、自动化割胶是天然橡胶产业发展的必由之路。

目前,割胶装备主要包括手动割胶刀、电动割胶设备以及自动割胶设备。其中,手动割胶刀主要为传统推式或拉式割胶刀,科研人员在操作简易度、舒适度、刀头耐用性及便携性等方面进行了优化^[4-5],但仍难以大幅降低割胶作业的技术难度,严重依赖专业胶工进行操作。电动割胶设备^[6-7]指以电机为动力源,胶工手持操控的割胶装置,能够降低胶工割胶作业的技术难度,提升割胶效率,具有简单易学,进刀深度与耗皮厚度易调节等优点^[8],能够在一定程度上缓解“胶工短缺”的产业困境,但由于依然需人工辅助作业,无法从根本上解决产业难题。自动割胶设备是一种无需人工参与,由机器自主完成进刀定位—走刀切割—退刀归位等过程的自动化装备,能够解决割胶作业出现的问题^[9-10]。近年来,随着机器人技术逐渐渗透到各个农业应用场景中^[11-18],自动化与智能化割胶装备受到越来越多植胶国的重视。

根据其运动方式,自动割胶设备可分为复合运动式及辅助运动式。复合运动式^[19-22]由周向运动与轴向运动复合而成,机构复杂,体积较大^[23-24],常应用于固定式自动割胶机。固定式割胶机需要在每棵橡胶树上配置一台割胶机,才能实现整片胶园的自动割胶,建设成本高。辅助运动式^[25-27]通常只包含割胶刀及相应的辅助装置,结构简单,但需借助外部多自由度设备完成螺旋轨迹运动^[28],轨迹规划难度高,精度差,且不能很好地控制割胶深度,极易割伤橡胶树。

为精简自动割胶装备的结构与体积,降低推广

成本,提高对割胶轨迹与割胶深度的控制精度,本文结合割胶技术要求,设计一种螺旋运动式自动割胶装置,确定其主要结构参数,探究不同传动轴、齿形结构在螺旋传动中对割胶刀安装台的稳定性影响,并进行割胶性能试验,以期为螺旋运动式自动割胶装备的研发与改进提供参考。

1 总体结构设计和工作原理

1.1 总体结构设计

螺旋运动式自动割胶装置安装在团队自研的林间履带自走式智能割胶机器人上,如图1所示。林间履带自走式智能割胶机器人主要由履带底盘、机械臂、割胶装置、识别相机与控制系统等部分组成。割胶装置与识别相机安装于机械臂末端,识别相机用于识别割胶轨迹位置,机械臂用于调整割胶装置至起割点,或可采用能够以笛卡尔坐标系方式移动的移动装置代替机械臂,割胶装置用于控制胶刀实现螺旋切割橡胶树皮,三者协调完成割胶作业,能够很好地控制割胶深度。

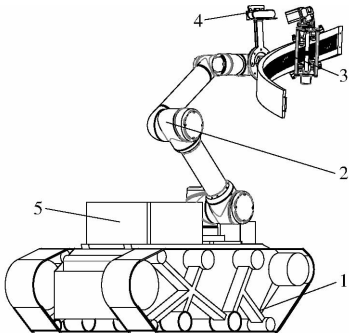


图1 林间履带自走式智能割胶机器人
Fig.1 Forest crawler self-propelled intelligent rubber-tapping robot

1.履带底盘 2.机械臂 3.割胶装置 4.识别相机 5.控制系统

螺旋运动式自动割胶装置整体结构主要由仿割胶轨迹螺旋轨道、螺旋传动机构及贴树仿形割胶机构等组成,具体结构如图2所示。

1.2 工作原理

螺旋运动式自动割胶装置的工作原理是通过电机输出扭矩,使齿轮轴与螺旋齿轨啮合传动,带动滑台在仿割胶轨迹螺旋轨道上滑动,实现割胶刀半螺旋环切橡胶树皮,完成割胶过程。该割胶装置具体割胶过程如图3所示。

具体步骤为:

(1)定点对位:在一个割胶周期起点,螺旋运动式自动割胶装置在外部调节机构的协助下,调整姿态至割胶刀与割胶轨迹的起割点水准对应位置(图3a)。

(2)进刀贴树:螺旋运动式自动割胶装置的整

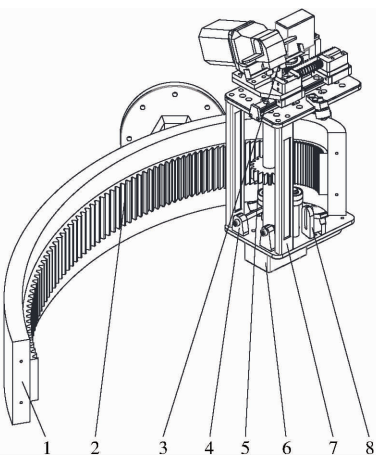


图 2 螺旋运动式自动割胶装置结构组成

Fig.2 Structural composition of automatic rubber-tapping device with spiral movement

1. 仿割胶轨迹螺旋轨道 2. 螺旋齿轨 3. 贴树仿形割胶机构
4. 横向限位装置 5. 传动轴 6. 减速电机 7. 滑台 8. 纵向限位装置

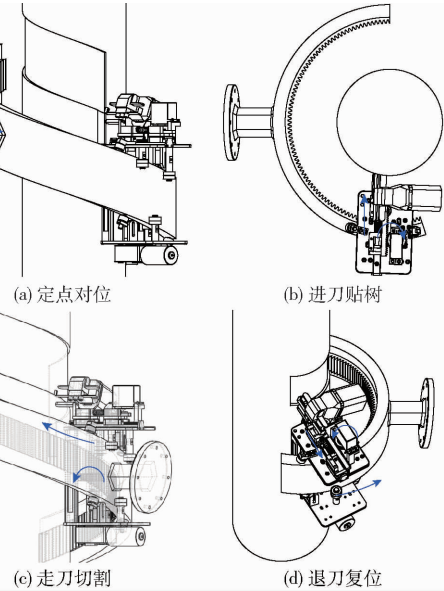


图 3 装置割胶过程示意图

Fig.3 Schematics of device tapping process

体姿态调整完毕后,舵机正转,通过齿轮齿条传动使得后部滑块推动前部滑块向前滑行,使得割胶刀贴近橡胶树干,待位于割胶刀底部的仿形块贴紧橡胶树割线下部的未割面后,后部滑块继续向前滑动一段距离,将置于两滑块之间的弹簧压缩,使仿形块紧贴橡胶树(图 3b)。

(3)走刀切割:电机反转,带动传动轴逆时针转动,与啮合的螺旋齿轨产生相对运动,滑台沿仿割胶轨迹螺旋轨道爬升,同时割胶刀环绕橡胶树干做螺旋切割(图 3c)。

(4)退刀复位:割胶刀切割至割胶终点时,电机停止转动,舵机反转,通过齿轮齿条传动使得后部滑块拉动前部滑块向后滑行,使割胶刀远离橡胶树,随

后电机正转,带动传动轴顺时针转动,滑台沿着仿割胶轨迹螺旋轨道下降,割胶刀回到起点位,完成一次割胶作业(图 3d)。

2 关键机构设计与分析

2.1 仿割胶轨迹螺旋轨道

2.1.1 割胶轨迹

割胶过程为胶刀在橡胶树干上以半螺旋方式环切树皮(图 4a),本文将橡胶树干简化为标准圆柱体,则橡胶树干上的螺旋割胶轨迹可表示为圆柱体曲面上的螺旋线,如图 4b 所示。

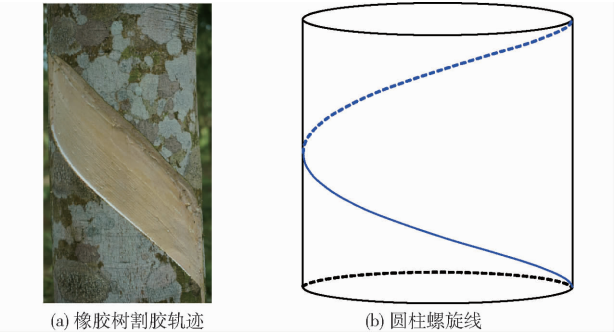


图 4 橡胶树割胶轨迹与圆柱螺旋线

Fig.4 Tapping track and cylindrical helix

将图 4b 圆柱螺旋线展开成平面上的一条直线后,可得螺旋线与圆柱体底面周长及高度的关系,如图 5 所示,可知

$$\frac{H}{C} = \tan \alpha \tag{1}$$

式中 H ——螺旋线环绕圆柱一周在圆柱素线上所形成的高度差,即该螺旋线导程,mm
 C ——圆柱体底面圆周长,mm
 α ——螺旋线上任一点的切线与圆柱体正截面倾角,即该螺旋线升角, ($^{\circ}$)

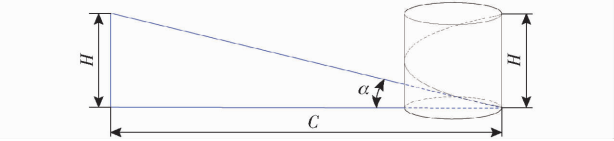


图 5 圆柱螺旋线的平面展开图

Fig.5 Plane expansion of cylindrical helix

由于螺旋运动可拆分成点在圆柱素线上的竖直运动与圆柱体的自转运动,以圆柱体底面圆心为坐标原点 O ,底面为 xOy 平面建立笛卡尔坐标系(图 6)。可得圆柱螺旋线即割胶轨迹方程为

$$\begin{cases} x(t) = a \cos(\omega t) \\ y(t) = a \sin(\omega t) \\ z(t) = \frac{H}{2\pi} \omega t \end{cases} \tag{2}$$

式中 a ——圆柱底面半径,mm

t ——运动时间, s
 ω ——圆柱体自转角速度, rad/s

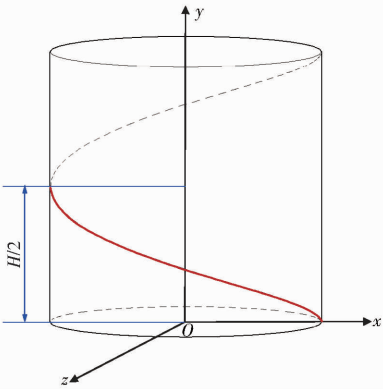


图 6 理论割胶轨迹
Fig.6 Theoretical tapping track

2.1.2 割胶刀倾角

在作业过程中割胶刀实际效果如图 7 所示,在割胶过程中,割胶刀沿轨迹线螺旋上升切割橡胶树皮,一部分被切碎的树皮碎屑会覆盖在刀面上。基于微分思想,将割胶轨迹无限分割,可将割胶刀切割橡胶树皮简化为割胶刀沿斜面向上切割。图 8 为割胶刀切割橡胶树皮的受力分析。



图 7 割胶作业
Fig. 7 Rubber tapping picture

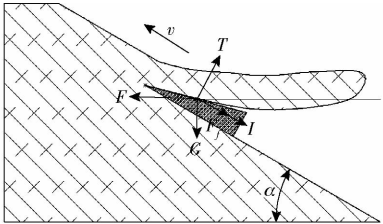


图 8 割胶过程中割胶刀的受力分析
Fig. 8 Force analysis diagram of rubber tapping knife

为保持割面的平整性,割胶刀以速度 v 在割胶斜面上匀速前进,建立方程

$$\begin{cases} F \cos \alpha - F_f - I - G \sin \alpha = 0 \\ T - F \sin \alpha - G \cos \alpha = 0 \\ F_f = T \tan \varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中 F ——割胶刀所受的圆周力, N
 F_f ——割胶刀所受的摩擦力, N

I ——割胶刀在切割方向所受的反作用力, N
 G ——割胶刀与覆盖在割胶刀上树皮碎屑的重力, N
 T ——割胶刀在垂直于割胶轨迹方向上所受的
反作用力, N
 φ ——橡胶树皮对割胶刀的摩擦角, ($^{\circ}$)

由式(3)可得,割胶刀倾角计算式为

$$\alpha = \arccos \left\{ \frac{I(F - G \tan \varphi)}{(F^2 + G^2)(1 + \tan^2 \varphi)} \pm \left[\frac{I(G \tan \varphi - F)}{(F^2 + G^2)(1 + \tan^2 \varphi)} - \sqrt{\frac{I^2 - (F \tan \varphi + G)^2}{(F^2 + G^2)(1 + \tan^2 \varphi)}} \right] \right\} \quad (4)$$

由式(4)可知,影响割胶刀倾角(也即圆柱螺旋线升角)选择的因素主要有电机扭矩、割胶刀与橡胶树皮摩擦因数、切割厚度等。根据文献[29],结合胶乳的流动特性,可得采用阳刀割胶时,圆柱螺旋线升角为 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时较为适宜,以升角为因素进行单因素试验,得出割胶刀倾角 $\alpha = 28^{\circ}$ 时割胶综合质量最优。

2.1.3 仿割胶轨迹螺旋轨道参数设计

仿割胶轨迹螺旋轨道用于保证割胶刀以所要求的螺旋切割轨迹进行割胶作业,其参数设计直接影响割胶效果。由于橡胶树大概在 7 年树龄开割一直持续到 30 年树龄结束割胶,年限跨度较长^[30],为了使割胶装置适应各树龄阶段的橡胶树,仿割胶轨迹螺旋轨道的直径宜以最大树龄阶段橡胶树的直径为参考。根据对 20 年以上树龄橡胶园中橡胶树树围的实地调研,选取最大树围 $C = 741 \text{ mm}$ 为参考量,并增加 50% 的活动余量,则仿割胶轨迹螺旋轨道半径为

$$a = \frac{C}{2\pi} \times 150\% \quad (5)$$

根据上述仿割胶轨迹螺旋轨道升角为 28° ,则该螺旋轨道导程 H 为

$$H = C \tan 28^{\circ} \quad (6)$$

为便于加工制造,将导程圆整,可得仿割胶轨迹螺旋轨道的参数方程式为

$$\begin{cases} x(t) = 177 \cos(\omega t) \\ y(t) = 177 \sin(\omega t) \\ z(t) = \frac{400}{2\pi} \omega t \end{cases} \quad (7)$$

2.2 贴树仿形割胶机构

螺旋运动式自动割胶装置的贴树仿形割胶机构结构示意图如图 9 所示,割胶刀固定在前滑块上,与后滑块通过弹簧柔性连接,后滑块由舵机通过齿轮齿条传动控制能够沿滑轨向靠近或远离橡胶树的方

向运动一定的距离。当后滑块向靠近橡胶树方向运动时为割胶刀进刀,割胶刀与仿形块贴紧橡胶树,并在橡胶树的反作用力下压缩弹簧,弹簧受压后向割胶刀提供预紧力,使得仿形块紧贴橡胶树。这种柔性连接的方式不仅能使仿形块紧贴树干,为割胶刀割胶提供合适的预紧力以稳定割胶深度,还能够避免因刚性连接割破橡胶树水囊皮造成伤树现象。

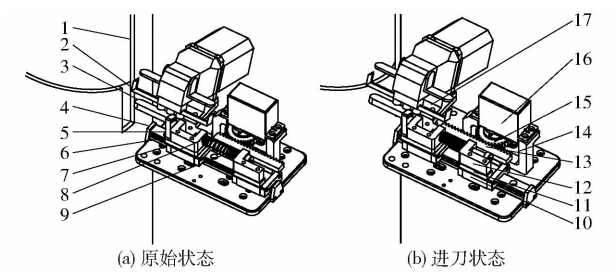


图9 贴树仿形割胶机构结构示意图

Fig.9 Structure diagrams of pasting and profiling rubber-tapping mechanism

1. 橡胶树模型 2. 割胶刀 3. 仿形块 4. 滑轨 5. U形块
6. 割胶刀固定板 7. 前滑块 8. 弹簧 9. 连接螺栓 10. 后滑块
11. 齿条固定板 12. L形块 13. 齿条 14. 舵机支撑架 15. 齿轮 16. 舵机 17. 割胶刀架

在进刀退刀的控制机构中,相比于直线型的直接推动式控制机构,齿轮齿条传动的旋转间接推动式控制机构,具有结构紧凑,简洁高效,工作平稳且可靠性高等优点,适合用于在该贴树仿形割胶机构中控制短距离进退刀。齿轮齿条及其他主要相关零部件的安装位置示意图如图10所示。

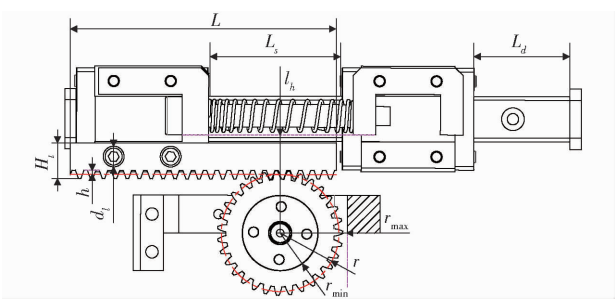


图10 齿轮齿条安装位置示意图

Fig.10 Installation schematic of gear and rack

由于齿轮安装于舵机臂与舵机支撑架中,其齿顶圆半径 r_a 与齿根圆半径 r_f 应满足

$$\begin{cases} r_a = \frac{m_t z_1}{2} + h_a^* m_t < r_{\max} \\ r_f = \frac{m_t z_1}{2} - (h_a^* + c^*) m_t > r_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

式中 m_t ——齿轮齿条模数,mm
 z_1 ——齿轮齿数
 h_a^* ——齿轮齿顶高系数
 c^* ——齿轮顶隙系数
 $r_{\max}$ ——舵机轴中心点与最近距离一侧的舵

机支撑架内边线的垂直距离,mm

$r_{\min}$ ——舵机臂半径,mm

由于齿条通过螺钉固定安装于后滑块上,位于L形块与舵机支撑架之间,所以齿条总宽 H_t 应满足

$$d_t + h < H_t < l_h - r_{\min} \quad (9)$$

式中 d_t ——固定螺钉的头部外圆直径,mm

h ——齿条齿全高,mm

l_h ——舵机轴中心点与L形块短边的垂直距离,mm

由于进刀过程中前滑块将压缩弹簧一定的距离,且机构中所使用的舵机为 180° 舵机,齿条长度 L 满足

$$L_d < L < L_d + L_s - l_{y\max} \quad (10)$$

其中 $L = z_2 \pi m_t \geq \frac{z_1 \pi m_t}{2} \quad (11)$

式中 L_d ——原始状态下前滑块前端面与滑轨前端面的距离,mm

L_s ——原始状态下前后滑轨间的距离,mm

$l_{y\max}$ ——弹簧最大压缩距离,mm

z_2 ——齿条齿数

联立式(8)~(11),代入各相关数据,可求得齿轮齿条参数的取值范围为

$$\begin{cases} 0 < m_t < \frac{32}{9} \\ \frac{65}{8} < z_1 < \frac{36}{m_t} - 2 \\ 6 + 2.25m_t < H < 17 \\ \frac{28}{\pi m_t} < z_2 < \frac{50.8}{\pi m_t} \\ z_2 > \frac{1}{2} z_1 \end{cases} \quad (12)$$

由于进刀退刀过程中前后滑块与滑轨为点接触的滑动摩擦,其摩擦力可忽略不计,且为低速运动,以减小齿轮齿条尺寸为原则,选取模数 $m_t = 1\text{ mm}$ 。齿轮齿条参数如表1所示。

表1 齿轮齿条参数

Tab.1 Parameters of gear and rack

项目	模数 m_t/mm	压力角 $\beta/(\text{^\circ})$	齿数 z	齿厚 B/mm	齿宽 H_t/mm
齿轮	1	20	31	5	
齿条			22	5	9.5

2.3 螺旋传动机构设计

螺旋传动机构主要包括螺旋齿轨、传动轴、滑台、横向限位装置、纵向限位装置、减速电机等(图2)。

螺旋传动机构的传动原理为由减速电机输出扭

矩,带动传动轴旋转并与螺旋齿轨啮合,使滑台沿仿割胶轨迹螺旋轨道螺旋滑动,实现滑台的螺旋运动。其中,横向限位调节装置与纵向限位调节装置可根据实际工况调节传动轴与螺旋齿轨的啮合位置以及提高滑台与仿割胶轨迹螺旋轨道的适应度,并可降低轮齿的磨损以提高其耐用性与啮合稳定性。

2.3.1 螺旋传动齿形选择

螺旋传动机构的啮合稳定性直接影响割胶轨迹剖面的平滑,啮合不稳定的螺旋传动系统将使剖面存在较多的锯齿或台阶,导致胶水凝集在锯齿与台阶处,难以收集,造成胶水的浪费。

在螺旋传动机构中,传动轴与螺旋齿轨啮合,传动轴同时完成绕螺旋中心轴的圆周运动与轴向运动,目前并未有针对此种运动类型的齿轮齿形设计。齿形是螺旋传动的核心,根据现有机械传动中齿轮传动、同步带轮传动以及链轮传动 3 种形式传动齿形,本文设计 3 种形式的螺旋传动齿形——渐开线齿、圆弧形齿以及三角形齿,如图 11 所示,采用虚拟样机分析技术对传动轴与螺旋齿轨啮合过程进行运动学分析,以获得最佳传动齿形和转速条件。

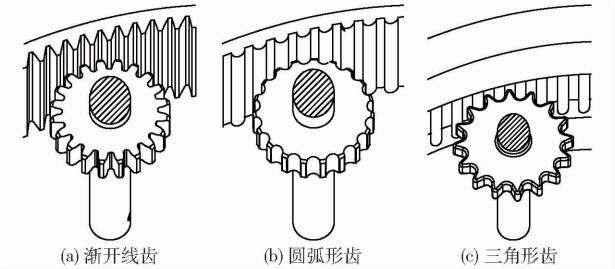


图 11 传动轴齿形结构示意图

Fig. 11 Tooth structure diagrams of transmission shaft

利用三维建模软件 SolidWorks 建立不同齿形结构的螺旋传动机构模型,省略非必要零部件以提高仿真运算效率,以 Parasolid 的格式导入 ADAMS 中(图 12),对各部件进行材料定义^[31],其中,仿割胶轨迹螺旋轨道与螺旋齿轨为树脂,横向限位轴承以及纵向限位轮为轴承钢,其余部件的材料为 6061 铝

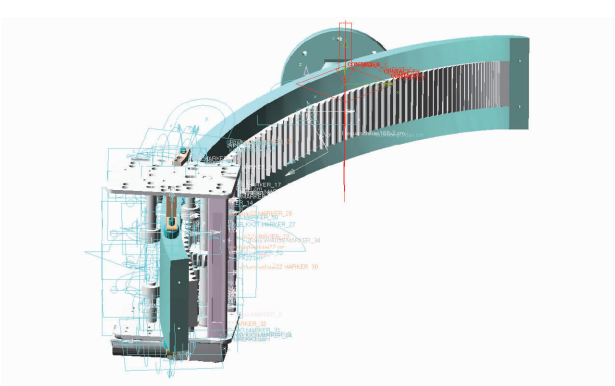


图 12 ADAMS 动力学仿真模型

Fig. 12 ADAMS dynamics simulation model

合金,如表 2 所示。

表 2 仿真部件材料属性参数

Tab. 2 Material property parameters of component			
材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/Pa	泊松比 μ
树脂	1 150	2.69×10^9	0.42
6061 铝合金	2 750	6.89×10^{10}	0.33
轴承钢	7 810	2.08×10^{11}	0.30

根据螺旋传动机构的实际工作情况,对各零部件施加条件约束,并对相互接触且存在相对运动的实体施加接触力,由于树脂与尼龙材料具有相似结构特性,选取尼龙材料的参数代替树脂,如表 3 所示。传动轴添加旋转驱动,根据常用割胶速度及电机型号(CHW-GW4058-3162 型)将传动轴转速设置为 12.00、13.67、15.33 r/min,仿真时间为各速度下完成一次完整割胶进程所需时间,步数为 500,进行对比仿真试验。

表 3 接触参数设置

Tab. 3 Contact parameters setting	
参数	数值
刚度/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	3 800.00 (树脂与树脂)
	3 807.76 (轴承钢与树脂)
力指数	2.00
阻尼系数/ $(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})$	1.52
渗透深度/mm	0.10
静摩擦因数	0.13
动摩擦因数	0.09
静平移速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	0.10
摩擦平移速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	10.00

割胶刀安装于滑台的上安装板,上安装板质心位置即可反映割胶刀的运动情况。在割胶圆周方向上,由于与进给方向相同,对割胶精度影响不大;在树干直径方向上会影响割胶深度,但由于配备贴树仿形机构,这部分误差会由仿形机构补偿,对割胶结果影响不大,而在树轴方向上会直接影响割胶耗皮量。耗皮量即割胶刀完成一次割胶作业后所切削橡胶树皮的厚度。耗皮量一般为 1.0 ~ 2.1 mm^[21]。当绝对误差大于等于 1.0 mm 易导致割胶刀脱刀,若脱刀后胶刀未能再切入树皮,将在剖面上形成台阶;若脱刀后再切入树皮,易在剖面上形成锯齿,严重影响割胶质量。因此,选取绝对误差 1.0 mm 为最大良好误差。

通过 ADAMS 的运动学仿真,以 0.2 s 为间隔记录仿真结果中上安装板质心位置在 z 轴方向的位移,将仿真位移与理论位移的绝对误差作为试验指标衡量螺旋传动机构的稳定性。各数据点绝对误差的散点图如图 13 ~ 15 所示。仿真结果如表 4 所示。

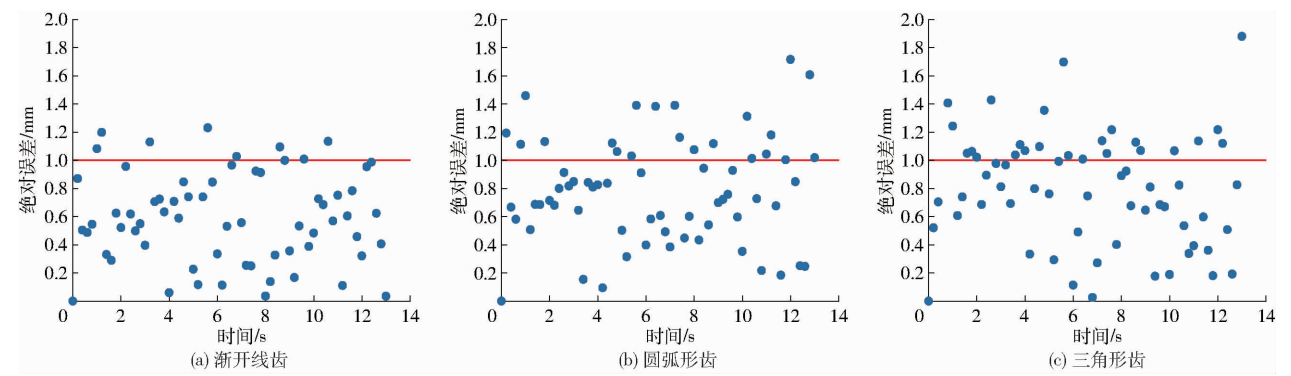


图 13 传动轴转速为 12.00 r/min 时上安装板质心在树轴方向上的绝对误差

Fig. 13 Absolute error values of upper mounting plate's mass center in tree axis direction when rotation speed of transmission shaft was 12.00 r/min

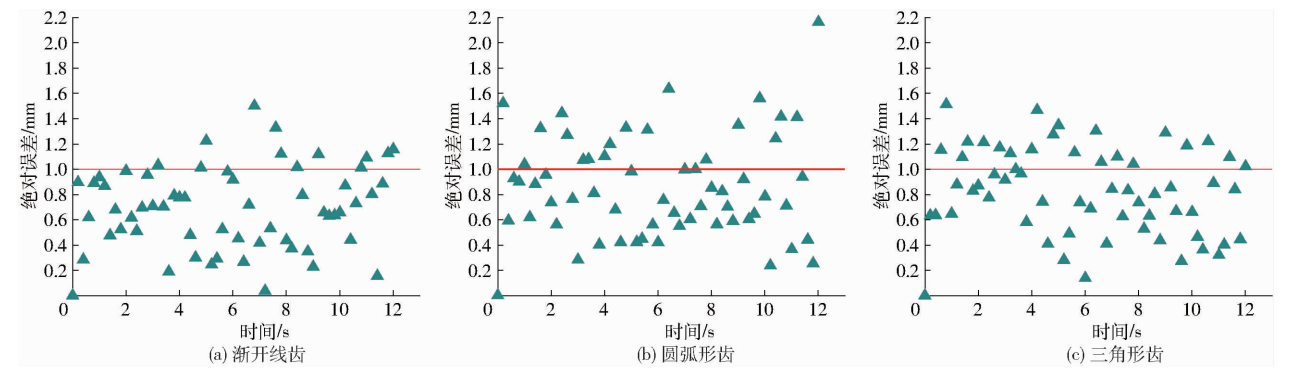


图 14 传动轴转速为 13.67 r/min 时上安装板质心在树轴方向上的绝对误差

Fig. 14 Absolute error values of upper mounting plate's mass center in tree axis direction when rotation speed of transmission shaft was 13.67 r/min

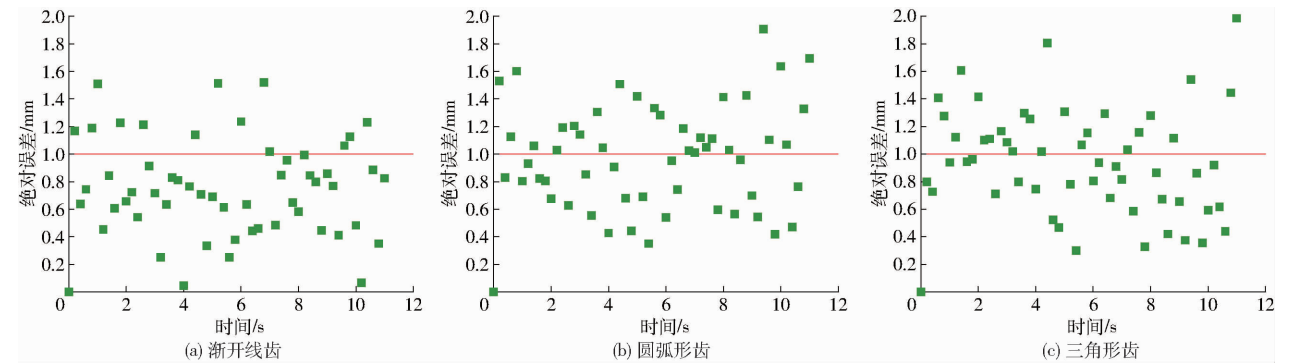


图 15 传动轴转速为 15.33 r/min 时上安装板质心在树轴方向上的绝对误差

Fig. 15 Absolute error values of upper mounting plate's mass center in tree axis direction when rotation speed of transmission shaft was 15.33 r/min

由表 4 可知,在相同传动轴转速下,渐开线螺旋传动齿齿形的最大绝对误差最小,且最大良好误差率(绝对误差小于 1 mm 的数据点数/总数据点数)大于其他两种齿形。因此,采用渐开线齿形的螺旋传动机构稳定性较优。而随着传动轴转速增加,3 种齿形的最大绝对误差均有增加的趋势,最大良好误差率均呈下降趋势,说明转速的增加会降低割胶稳定性。

2.3.2 螺旋传动齿轮设计

在割胶作业过程中,传动轴与螺旋齿轨啮合传动,传动轴与橡胶树干位于同一侧,为不发生传动过

程中齿轮轴及滑台各零部件与树干的干涉现象,应减小齿轮轴体积,宜采用模数较小的齿轮。结合模数选取经验公式^[32]

$$m_l = (0.015 \sim 0.02)x \quad (13)$$

式中 m_l ——传动轴与螺旋齿轨模数,mm

x ——齿轮传动中心距,mm

根据橡胶树直径与仿割胶轨迹螺旋轨道内弧面的半径,确定齿轮传动中心距 x 取值范围为

$$118 \text{ mm} < x < 167 \text{ mm} \quad (14)$$

结合式(13)、(14),选用传动齿轮模数 m_l 为 2 mm,并确定齿轮轴齿数 Z_1 为 20。

表 4 不同传动轴齿形、转速下滑台稳定性对比
Tab.4 Stability comparison of sliding with different teeth of transmission shaft and rotating speeds

传动轴齿形	传动轴转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	最大绝对 误差/mm	最大良好 误差率/%
渐开线齿	12.00	1.231	87.88
	13.67	1.500	80.33
	15.33	1.519	76.79
圆弧形齿	12.00	1.712	68.18
	13.67	2.163	68.85
	15.33	1.908	48.21
三角形齿	12.00	1.880	63.64
	13.67	1.512	65.57
	15.33	1.986	55.36

由于螺旋齿轨固定安装于仿割胶轨迹螺旋轨道的内弧面侧,即仿割胶轨迹螺旋轨道内弧面直径为螺旋齿轨的外圈直径,如图 16 所示。

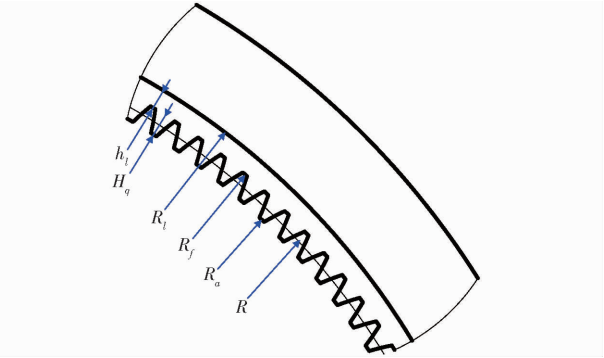


图 16 仿割胶轨迹螺旋轨道与螺旋齿轨安装简图

Fig.16 Installation diagram of spiral track and spiral gear track

在内啮合齿轮传动中,内齿圈的外圈厚度应至少为一个齿全高高度,即

$$R_l = R_f + h_l$$

(15)

其中

$$\begin{cases} R_f = R + m_l H_f \\ h_l = n H_q \\ H_q = R_f - R_a \\ R_a = R - H_a \\ R = m_l Z_2 \\ H_f = (H_a^* + C^*) m_l \\ H_a = H_a^* m_l \end{cases}$$

(16)

式中 R_l ——仿割胶轨迹螺旋轨道内弧面半径,即螺旋齿轨外圈半径,mm

R_f ——螺旋齿轨齿根圆半径,mm

h_l ——螺旋齿轨的外圈厚度,mm

R ——螺旋齿轨分度圆半径,mm

n ——螺旋齿轨齿全高高度的个数,取 $n \geq 1$

H_q ——螺旋齿轨齿全高,mm

R_a ——螺旋齿轨齿顶圆半径,mm

Z_2 ——螺旋齿轨原内齿圈的齿数

H_a ——螺旋齿轨齿顶高,mm

H_f ——螺旋齿轨齿根高,mm

H_a^* ——螺旋齿轨齿顶高系数

C^* ——螺旋齿轨顶隙系数

由于螺旋齿轨的外圈厚度过大将使齿轮轴靠近橡胶树干而影响装置的割胶作业,此处螺旋齿轨的外圈厚度以最少齿全高高度设计,即选取 $n = 1$,联立以上方程,可得螺旋齿轨原内齿圈齿数 Z_2 为 160。

3 割胶试验

为有效验证螺旋运动式自动割胶装置的实际工作性能,搭建割胶试验台架,如图 17 所示,于 2022 年 7 月在海南大学天然橡胶试验地开展割胶作业试验。

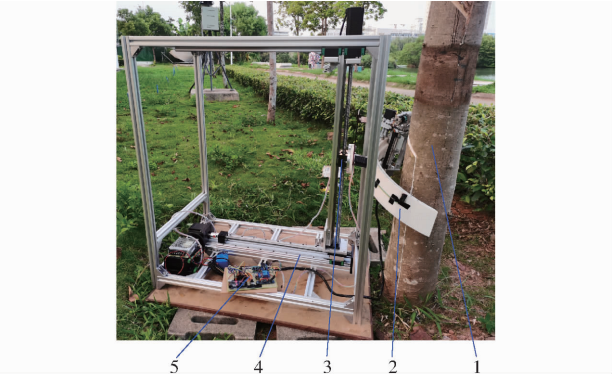


图 17 割胶试验台架

Fig.17 Rubber tapping test rig

1. 橡胶树 2. 割胶装置 3. 轴向位置调节丝杆 4. 径向位置调节丝杆 5. 控制系统

3.1 试验方法

试验选取减速电机转速、割胶耗皮厚度和橡胶树直径为试验因素,其中减速电机转速为减速电机传动轴转速;割胶耗皮厚度为割胶刀起割点距原割面的垂直高度;橡胶树直径为距离地面 1.0 m 处所测量的树干直径。在前期仿真与预试验的基础上,确定三因素三水平正交试验各因素的取值如表 5 所示。每组试验重复割胶 3 次,取平均值作为试验结果。

表 5 试验因素水平

Tab.5 Testing factors and levels

水平	因素		
	传动轴转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	耗皮厚度/mm	橡胶树直径/ mm
1	12.00	1.0	150
2	13.67	1.5	175
3	15.33	2.0	200

3.2 试验指标

在橡胶树树皮的皮层结构中,水囊皮主要用于输导营养物质,且包含一部分未成熟的幼嫩乳管,位于黄皮之后,厚度不足 1 mm,割胶过程中极易因进刀过深而割破水囊皮,造成营养物质流失,从而影响橡胶树产量。因此,选取割胶深度合格率与割面平滑度合格率为试验指标。

割胶深度合格率的测量方法为在完成一次割胶后,沿着割胶轨迹每间隔 1 cm 使用游标卡尺测量一次,从割线内切口处垂直树干方向刺入,至抵住木质部止,测定刺入深度,当割胶深度位于 1.2 ~ 1.8 mm 区间时,为合格,合格率计算式为

$$U = \frac{w}{W} \times 100\%$$
 (17)

式中 U ——割胶深度合格率,%
 w ——合格测量点数
 W ——总测量点数

割面平滑度合格率测量方法为在完成一次割胶后,测定有明显锯齿状和台阶状的割线长度,计算式为

$$P = \left(1 - \frac{y}{Y}\right) \times 100\%$$
 (18)

式中 P ——割面平滑度合格率,%
 y ——割线出现锯齿状和台阶状的长度,mm
 Y ——割线长度,mm

3.3 试验结果分析

割胶试验结果如表 6 所示, A 、 B 、 C 分别表示传动轴转速、耗皮厚度、橡胶树直径的水平。

表 6 割胶试验正交试验结果

Tab.6 Orthogonal test results of tapping

序号	因素			割胶深度 合格率/%	割面平滑度 合格率/%
	A	B	C		
1	1	1	1	83.33	87.18
2	1	2	2	90.00	91.43
3	1	3	3	95.45	94.98
4	2	1	2	85.00	88.86
5	2	2	3	90.91	91.88
6	2	3	1	88.89	94.43
7	3	1	3	77.27	81.70
8	3	2	1	77.78	86.05
9	3	3	2	80.00	90.20

采用极差分析研究各试验因素对割胶深度合格率和割面平滑度合格率两个试验指标的影响,结果如表 7 所示,可知,试验因素对割胶深度合格率影响的主次顺序是:传动轴转速、耗皮厚度、橡胶树直径;试验因素对割面平滑度合格率影响的主次顺序是:耗皮厚度、传动轴转速、橡胶树直径。

表 7 试验指标极差分析

Tab.7 Range analysis of test indexes %

项目	割胶深度合格率			割面平滑度合格率		
	A	B	C	A	B	C
$\overline{K_1}$	89.60	81.87	83.33	91.19	85.91	89.22
$\overline{K_2}$	88.27	86.23	85.00	91.91	89.79	90.16
$\overline{K_3}$	78.35	88.11	87.88	87.40	93.20	89.52
R	11.25	6.25	4.55	4.51	7.29	0.94

由表 7 可知,割胶深度合格率最优组合为 $A_1B_3C_3$; 割面平滑度合格率最优组合为 $A_2B_3C_2$ 。结合分析结果,对最优组合中具有差异的传动轴转速(A_1 和 A_2)和橡胶树直径(C_2 和 C_3)进一步分析。传动轴转速为 A_1 时割胶深度合格率高于传动轴转速为 A_2 时割胶深度合格率,且割面平滑度合格率降低幅度小于 1.00 个百分点,对橡胶树产胶流胶影响小;橡胶树直径为 C_3 时割胶深度合格率高于橡胶树直径为 C_2 时割胶深度合格率,且两者的割面平滑度合格率仅相差 0.64 个百分点。因此,割胶装置割胶的最优组合确定为 $A_1B_3C_3$,即传动轴转速为 12.00 r/min、耗皮厚度为 2 mm、橡胶树直径为 200 mm。

方差分析结果如表 8 所示。由表 8 可知,传动轴转速和耗皮厚度对割胶深度合格率与割面平滑度合格率都具有显著影响。橡胶树直径对割胶深度合格率与割面平滑度合格率的试验结果无影响。综合表 7、8,可知当割胶装置传动轴转速为 12.00 r/min 时,对不同直径橡胶树都具有较好的割胶效果;割胶深度合格率和割面平滑度合格率都与耗皮厚度和橡胶树直径呈正相关,且不同直径之间割胶深度与割面平滑度的合格率差值较小,说明自动割胶装置能够适应不同树龄的橡胶树。

表 8 试验指标方差分析

Tab.8 Variance analysis of test indexes

差异源	离均差平方和	自由度	F	P	
割胶深度 合格率	A	226.56	2	85.35	0.012 *
	B	61.58	2	23.20	0.041 *
	C	31.73	2	11.95	0.077
	误差	2.65	2		
	总和	322.52	8		
割面平滑 度合格率	A	60.42	2	62.22	0.016 *
	B	79.79	2	82.17	0.012 *
	C	1.39	2	1.43	0.410
	误差	0.97	2		
	总和	142.57	8		

注: * 表示显著 ($P < 0.05$)。

为验证最优组合在螺旋运动式自动割胶装置中的工作效果,将最优组合 $A_1B_3C_3$ 进行 3 次动态验证性试验,试验测得割胶深度合格率分别为 95.45%、

90.90%、95.45%，平均合格率为93.93%；割面平滑度合格率分别为92.37%、94.17%、96.41%，平均合格率为94.32%；能够满足割胶作业的要求。

4 结 论

(1) 针对橡胶树割胶作业要求，设计了一种螺旋运动式自动割胶装置，由仿割胶轨迹螺旋轨道、螺旋传动机构和贴树仿形割胶机构组成，该割胶装置作业效果能够达到割胶技术要求，完成一次割胶作业时间小于15 s，不仅提高了割胶作业效率，也为螺旋式割胶装置设计提供了思路。

(2) 将割胶轨迹螺旋化，确定仿割胶轨迹螺旋

轨道的螺旋方程，在螺旋传动中采用虚拟样机技术对渐开线齿、圆弧形齿、三角形齿3种齿形结构的稳定性进行运动学仿真，分析了3种齿形结构螺旋传动系统在树轴方向上的传动稳定性，最终确定了以渐开线齿为螺旋传动机构的最佳传动齿形。

(3) 通过正交试验研究了传动轴转速、耗皮厚度、橡胶树直径3个试验因素对割胶深度合格率和割面平滑度合格率的影响规律。试验结果表明，最优参数组合为传动轴转速为12.00 r/min、耗皮厚度为2 mm、橡胶树直径为200 mm，在最优参数组合下割胶深度平均合格率为93.93%，割面平滑度平均合格率为94.32%，符合割胶技术要求。

参 考 文 献

- [1] SALEHI M, CORNISH K, BAHMANKAR M, et al. Natural rubber-producing sources, systems, and perspectives for breeding and biotechnology studies of *Taraxacum kok-saghyz*[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170: 113667.
- [2] SANT'ANNA I C, GOUVEA L, MARTINS M A, et al. Genetic diversity associated with natural rubber quality in elite genotypes of the rubber tree[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1081.
- [3] 黄华孙. 现代农业产业技术体系建设理论与实践-天然橡胶体系分册[M]. 1版. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [4] PRAMCHOO W, GEATER A F, HARRIS-ADAMSON C, et al. Ergonomic rubber tapping knife relieves symptoms of carpal tunnel syndrome among rubber tappers[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2018, 68: 65–72.
- [5] SUSANTO H, ALI S, HANIF. The design of flexible rubber tapping tool with settings the depth and thickness control[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 506(1): 12002.
- [6] WANG Lingling, CAO Jianhua, ZHENG Yong, et al. The development and application of advanced design and manufacturing techniques on type 4GXJ-I of cordless brushless tapping knife[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 592(1): 12143.
- [7] HUANG Chang, WANG Lingling, CAO Jianhua, et al. The technology research on cutting test of 4GXJ-I tapping knife for rubber tree[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 592(1): 12070.
- [8] 黄敞, 郑勇, 王玲玲, 等. 便携式电动胶刀割胶技术与切割试验[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(23): 260–263.
HUANG Chang, ZHENG Yong, WANG Lingling, et al. Tapping technology and cutting test of portable electric tapping knife for rubber tree[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(23): 260–263. (in Chinese)
- [9] 杜岳峰, 傅生辉, 毛恩荣, 等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 1–17.
DU Yuefeng, FU Shenghui, MAO Enrong, et al. Development situation and prospects of intelligent design for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 1–17. (in Chinese)
- [10] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1–18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1–18. (in Chinese)
- [11] 刘成良, 贡亮, 苑进, 等. 农业机器人关键技术研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 1–24.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1–24. (in Chinese)
- [12] 赵智宇, 朱立成, 周利明, 等. 丘陵果园除草机器人底盘系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 48–57.
ZHAO Zhiyu, ZHU Licheng, ZHOU Liming, et al. Design and experiment of chassis control system for weeding robot in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.1): 48–57. (in Chinese)
- [13] 叶秉良, 唐涛, 杨秋兰, 等. 柳树插条自动喂入装置取料机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 93–99.
YE Bingliang, TANG Tao, YANG Qiulan, et al. Optimization design and tests of picking mechanism of automatic feeding device for willow cuttings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 93–99. (in Chinese)
- [14] 祝露, 王德成, 尤泳, 等. 履带式林间草带收割机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 126–133.
ZHU Lu, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and experiment of crawler-type grass belt harvester in forest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 126–133. (in Chinese)
- [15] 孟令刚, 范松涛, 周燕. 大型平移式喷灌机分布式级联协同导航控制方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 137–145.
MENG Linggang, FAN Songtao, ZHOU Yan. Distributed cascading cooperative navigation control method of large-scale lateral

moving sprinkler irrigation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 137–145. (in Chinese)

[16] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 1–20.
YU Gaohong, WANG Lei, SUN Liang, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1–20. (in Chinese)

[17] 张晋国,郑超,赵金,等. 棉花打顶机自动对行装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 93–101.
ZHANG Jinguo, ZHENG Chao, ZHAO Jin, et al. Design and experiment of auto-follow row device for cotton topping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 93–101. (in Chinese)

[18] 赵文文,王海峰,朱君,等. 猪舍消杀巡检机器人系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 270–277.
ZHAO Wenwen, WANG Haifeng, ZHU Jun, et al. Research and design of pig house disinfecting inspection robot system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2): 270–277. (in Chinese)

[19] 张喜瑞,曹超,张丽娜,等. 仿形进阶式天然橡胶自动割胶机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 99–108.
ZHANG Xirui, CAO Chao, ZHANG Li'na, et al. Design and test of profiling progressive natural rubber automatic tapping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 99–108. (in Chinese)

[20] 高锋,孙江宏,何宇凡,等. 基于 RPP 串联机构的固定式割胶机设计与仿真分析[J]. 制造技术与机床, 2022(4): 26–31.
GAO Feng, SUN Jianghong, HE Yufan, et al. Design and analysis of fixed tapping robot based on RPP series mechanism[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(4): 26–31. (in Chinese)

[21] 张春龙,李德程,张顺路,等. 基于激光测距的三坐标联动割胶装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 121–127.
ZHANG Chunlong, LI Decheng, ZHANG Shunlu, et al. Design and test of three-coordinate linkage natural rubber tapping device based on laser ranging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 121–127. (in Chinese)

[22] 汝绍锋,李梓豪,梁栋,等. 基于 Pro/Mechanica 的轨道式割胶机设计及分析[J]. 制造业自动化, 2019, 41(1): 48–52.
RU Shaofeng, LI Zihao, LIANG Dong, et al. Design and analysis orbital tapping machine based on Pro/Mechanica[J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(1): 48–52. (in Chinese)

[23] 高可可,孙江宏,高锋,等. 固定式割胶机器人割胶误差分析与精度控制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 44–50.
GAO Keke, SUN Jianghong, GAO Feng, et al. Tapping error analysis and precision control of fixed tapping robot[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(2): 44–50. (in Chinese)

[24] ABHILASH K S, SUDHEER BABU V V, NISAM RAHMAN A, et al. Investigative study on the feasibility of simultaneous movement along multiple axes for helical cut using RTM[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 3422–3425.

[25] 张春龙,盛希宇,张顺路,等. 天然橡胶机械化采收锯切功耗影响因素试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 32–37.
ZHANG Chunlong, SHENG Xiyu, ZHANG Shunlu, et al. Experiment of influence factors on sawing power consumption for natural rubber mechanical tapping[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 32–37. (in Chinese)

[26] 周航,张顺路,翟毅豪,等. 天然橡胶割胶机器人视觉伺服控制方法与割胶试验[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 56–64.
ZHOU Hang, ZHANG Shunlu, ZHAI Yihao, et al. Vision servo control method and tapping experiment of natural rubber tapping robot[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 56–64. (in Chinese)

[27] NIE F, ZHANG W, WANG Y, et al. A forest 3-D LiDAR SLAM system for rubber-tapping robot based on trunk center atlas[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 27(5): 1–11.

[28] ZHOU Hang, ZHANG Shunlu, ZHANG Junxiong, et al. Design, development, and field evaluation of a rubber tapping robot[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(1): 28–54.

[29] 中华人民共和国农业农村部, 农业农村部热带作物及制品标准化技术委员会. NY/T 1088—2020 橡胶树割胶技术规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2020.

[30] 李达. 橡胶主产区农户种植意愿分析及产业决策研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
LI Da. Research on farmers' rubber planting willingness and industrial decision in major rubber[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. (in Chinese)

[31] 崔永杰,卫咏哲,丁辛亭,等. 基于圆柱凸轮的株距可调式取苗末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 104–114.
CUI Yongjie, WEI Yongzhe, DING Xinting, et al. Design and experiment of adjustable spacing end-effector based on cylindrical cam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 104–114. (in Chinese)

[32] 李文正. 渐开线直齿圆柱齿轮设计中模数及齿数的选择[J]. 现代制造技术与装备, 2013(6): 23–24.
LI Wenzheng. Involute spur gear teeth design modulus and choice of gear teeth number[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2013(6): 23–24. (in Chinese)