

仿形进阶式天然橡胶自动割胶机设计与试验

张喜瑞¹ 曹超¹ 张丽娜² 邢洁洁¹ 刘俊孝¹ 董学虎³

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

3. 海南省农业机械鉴定推广站, 海口 570206)

摘要:为解决我国天然橡胶割胶工作强度高、技术难度大及割胶工紧缺等问题,本文设计一种仿形进阶式天然橡胶割胶机,通过分析割胶轨迹得到割胶轨迹方程,设计采用丝杠传动实现竖直运动和圆柱齿轮啮合传动实现椭圆运动的复合运动为割胶运动方式。工作时,整机通过可调式捆绑机构固定于橡胶树上;利用 Arduino 开发板控制电机的动作顺序,采用直流推杆控制割胶机进刀退刀动作,采用减速步进电机完成割胶机复合割胶运动,采用步进电机完成移位动作。为验证该机性能,利用 Design-Expert 软件设计并进行林间试验。结果表明:当割胶机在减速步进电机转速 21 r/min、刀具角度 25°和拉簧预紧力 20 N 时,割胶质量最佳且耗电量最低,前 5 min 排胶量为 6.29 mL、平均耗电量为 1.07 W·h,满足设计要求。

关键词: 割胶机; 仿形进阶式; 固定式; 自动控制

中图分类号: S23

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)04-0099-10

OSID:



Design and Test of Profiling Progressive Natural Rubber Automatic Tapping Machine

ZHANG Xirui¹ CAO Chao¹ ZHANG Li'na² XING Jiejie¹ LIU Junxiao¹ DONG Xuehu³

(1. Mechanical and Electrical Engineering College, Hainan University, Haikou 570228, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Hainan Agricultural Machinery Appraisal and Extension Station, Haikou 570206, China)

Abstract: To solve the problems of high working intensity, high technical difficulty, and shortage of cutting workers of natural rubber in China, a profiling progressive natural rubber tapping machine was designed. Through the analysis of the tapping trajectory equation, the lead screw transmission implemented vertical movement and the cylindrical gear meshing transmission were used to achieve the compound movement of the elliptic motion for the tapping movement way. When the whole machine was working, it was fixed on the rubber tree through the adjustable binding mechanism; the Arduino development board was used to control the motor's action sequence, Dc motor rod was used to control the knife in and out of the cutting machine, decelerating stepper motor was used to complete the compound cutting machine's rubber cutting movement, and the stepping motor was used to complete the displacement action. To verify the performance of the machine for forest test, Design-Expert software was used to design and test. The results showed that when the rubber tapping machine was at a motor speed of 21 r/min, a cutter angle of 25° and a tension spring preload of 20 N, the quality of rubber tapping was the best and the power consumption was the lowest, with a discharge volume of 6.29 mL in the first five minutes and average power consumption of 1.07 W·h. The research result can provide a reference for the subsequent development of mechanized and intelligent rubber tapping equipment.

Key words: rubber tapping machine; profiling progressive; stationary; automatic control

收稿日期: 2022-01-26 修回日期: 2022-02-18

基金项目: 海南省院士创新平台科研专项(YSPZX202109、YSPZX202008)、海南省重点研发计划项目(ZDYF2021XDNY198)、海南省自然科学基金青年基金项目(520QN233)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-33-JX2)

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: 邢洁洁(1991—),男,讲师,主要从事天然橡胶智能化生产技术与装备研究,E-mail: 584731137@qq.com

0 引言

天然橡胶是我国重要的战略物资和工业原料,天然橡胶产业在我国经济发展中具有重要作用^[1-2]。割胶是指通过特制割胶工具割破橡胶树产胶功能层树皮获得天然乳胶的过程^[3],是天然橡胶生产的中心环节和关键技术^[4-5]。目前,天然橡胶的获取依旧延续传统人工割胶方式,对胶工技术要求高,且劳动强度大、生产效率低,割胶所需人工成本占生产成本 70% 以上^[6]。此外,受胶工老龄化和年轻胶工紧缺双重因素影响,海南及广东农垦等地出现弃割改种等现象,严重阻碍我国天然橡胶产业的健康发展^[7-8]。为降低人工割胶强度、缓解用工难现状,通过农机农艺相融合,研发智能化割胶装备替代人工割胶是必然趋势^[9-11],智能化割胶装备可以有效降低割胶对人工的依赖性,降低割胶人工成本,提高天然橡胶产出率^[12-14]。

但是,由于自动化、智能化割胶技术及装备研发正处于起步阶段^[15-17],严重制约了天然橡胶产业的健康发展。目前割胶装备主要分为电动割胶刀^[18-19]、移动式割胶机器人^[20-22]和固定式割胶机^[23-24]。电动割胶刀在一定程度上能降低胶工劳动强度和割胶技术难度^[25],但只能辅助人工割胶,并未从根源解决胶工短缺的问题。移动式割胶机器人采用机器视觉^[26]、深度相机^[27]等技术实现林间导航与轨迹规划^[28],对作业环境要求较高,且成本高昂,并难以适应山区作业。固定式割胶机整机安装于橡胶树干上,整机具有造价成本低、结构轻量化以及割胶运动稳定等优势,可稳定完成精准割胶工作,是实现自动化割胶的重要途径。

国内外学者针对固定式割胶装备,展开了相关研究。张春龙等^[25]设计一种锯切式割胶装置,针对锯片直径、齿数及切割电机转速等参数对锯切式割胶装置切割功耗的影响进行研究。罗庆生等^[29]设计一款便携式自动割胶机器人,利用开合结构和顶紧螺钉抱紧橡胶树进行割胶工作,提高了割胶机对不同树径橡胶树的适应性。文献[30]研制了一种自动割胶系统,采用两个直线导轨组合式运动方式实现割胶轨迹。汪雄伟等^[31]设计一种固定式全自动智能控制橡胶割胶机,通过距离传感器反馈数据,分析获取适宜割胶深度,实现割刀进给量调节。高可等^[32]设计一种固定式割胶机器人,整机采用高分子材料制成,利用超声波传感器搭配 PID 控制算法控制刀具进给量。ZHANG 等^[33]设计一种悬挂式割胶机,通过柔性轮廓建模和机械间距结构分别控制切割深度和树皮消耗。张春龙等^[34]设计一种基

于激光测距的三坐标联动割胶装置,通过控制三坐标平台联动,实现割刀按激光测定的空间曲线路径运动。以上研究为机械化、智能化割胶装备的设计提供了多种思路,但相关装备的割胶质量、安装稳定性难以满足实际生产,且生产成本较高,难以普及。

为进一步提高固定式割胶机的割胶质量和安装稳定性,以及降低生产成本,结合国内橡胶割胶技术规程^[35],设计一种仿形进阶式天然橡胶割胶机,优化割胶运动机构和割胶执行机构等关键部件,采用机械仿形限深降低生产成本,并进行林间试验,以期天然橡胶种植区割胶工作提供机具参考。

1 整机结构与工作过程

1.1 整体结构

仿形进阶式天然橡胶割胶机整机结构如图 1 所示,该机器主要由可调式捆绑机构、割胶执行机构、割胶传动机构和驱动控制模块组成,其中可调式捆绑机构由齿型同步带、楔块及棘轮金属捆绑带组成;割胶执行机构由直流推杆、末端执行器安装滑块架、锥齿轮、收刀曲柄、角度调节板等组成;割胶运动机构由丝杠、圆柱齿轮、减速步进电机和步进电机等组成;控制模块采用 Arduino uno r3 开发板和多款电机驱动模块搭建。

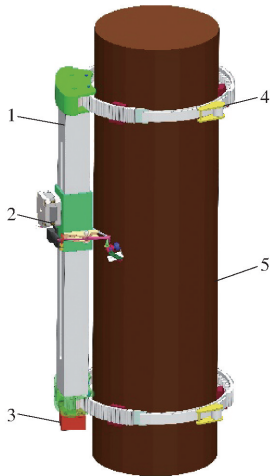


图 1 仿形进阶式天然橡胶割胶机结构示意图
Fig. 1 Structure composition of profiling progressive natural rubber tapping machine

1. 滑块支架 2. 割胶执行机构 3. 割胶传动机构 4. 可调式捆绑机构 5. 橡胶树模型

1.2 工作原理

割胶机通过可调式捆绑机构固定于橡胶树上,具体割胶过程如下:割胶机蓝牙模块收到割胶开始指令后,推杆伸出,割胶刀受拉簧预紧力作用张紧,推杆完全伸出时停止运动;减速电机开始正转,带动割胶执行机构沿橡胶树径向进行螺旋上升运动,割

胶刀从起割点开始割胶工作,割胶刀到达结束点时,减速电机停转;推杆收回,通过收刀曲柄,拉动割胶刀收回;减速电机反转,割胶执行机构做螺旋下降运动;割胶刀回至起割点,步进电机正转,带动割胶执行机构沿丝杠下移一段距离(耗皮量)后停止,等待下次割胶开始指令。割胶运动机构通过控制模块控制各个电机的顺序动作,以完成割胶运动。

割胶执行机构沿橡胶树干进行螺旋运动是割胶作业的关键运动,由割胶运动机构完成,其实现原理为:减速步进电机输出轴与圆柱齿轮进行传动,同时输出轴与丝杠连接,控制减速步进电机转动,可同时控制圆柱齿轮与丝杠转动;圆柱齿轮与齿型同步带的齿圈啮合传动,带动割胶运动机构沿齿型同步带进行椭圆运动;在减速步进电机作用下,丝杠螺母带动末端执行器沿滑块支架做直线运动;将椭圆运动和直线运动复合,实现割胶执行机构沿橡胶树干进行空间螺旋运动。减速步进电机正转时,末端执行器螺旋上升;减速步进电机反转时,末端执行器螺旋下降。

2 关键机构设计

2.1 可调式捆绑机构

齿形同步带采用聚氨酯钢丝材料,材料质量轻、硬度好,且具有良好的弹性和韧性,一方面能保证不影响橡胶树的正常生长,另一方面能达到更好的贴树仿形效果。齿型同步带外侧设计为齿型形状与圆柱齿轮啮合传动,内侧设计为凸台形状,每个凸台间设有间隙,确保齿型同步带能够与橡胶树紧密贴合。齿型同步带两端安装有棘轮金属捆绑带,通过转动棘轮束紧齿型同步带,将割胶机固定在橡胶树上。考虑到橡胶树的横截面非标准圆形,为保证割胶运动的平稳性和割胶质量,采用楔块配合使用的方式,使上下两个齿型同步带中心连线与橡胶树中心轴线保持方向一致,具体结构如图2所示。

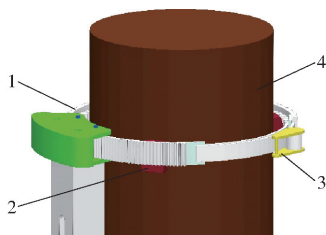


图2 可调式捆绑机构示意图

Fig. 2 Schematic of adjustable binding mechanism

1. 棘轮金属捆绑带 2. 楔块 3. 齿型同步带 4. 橡胶树模型

2.2 割胶传动机构

2.2.1 割胶轨迹

为简化计算,忽略橡胶树表面的凸起,将树干视

为标准椭圆柱体,空间螺旋割胶轨迹可视为椭圆柱面螺旋线,如图3所示。

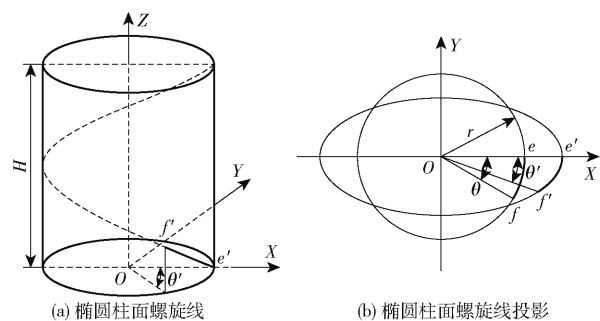


图3 椭圆柱面螺旋线示意图

Fig. 3 Schematics of elliptic cylindrical helices

椭圆方程及参数方程分别为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} x = a \cos \theta' \\ y = b \sin \theta' \end{cases} \quad (0 < \theta' \leq 2\pi) \quad (2)$$

式中 a ——椭圆长半轴长度, mm

b ——椭圆短半轴长度, mm

θ' ——曲线 $l_{e'f'}$ 段对应弧长所对应角, ($^\circ$)

该椭圆同胚映射圆半径为

$$r = \frac{2\pi b + 4(b-a)}{2\pi} \quad (3)$$

式中 r ——椭圆同胚映射圆半径, mm

对椭圆方程式(2)求导可得

$$\begin{cases} dx = -a \sin \theta' d\theta' \\ dy = b \cos \theta' d\theta' \end{cases} \quad (4)$$

则椭圆任意微分弧长 s 为

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (5)$$

即

$$ds = \sqrt{(a \sin \theta')^2 + (b \cos \theta')^2} d\theta' \quad (6)$$

角度 θ' 对应弧长 s 为

$$s = \int_0^{\theta'} r d\theta' = \int_0^{\theta'} ds = \int_0^{\theta'} \sqrt{(a \sin \theta')^2 + (b \cos \theta')^2} d\theta' \quad (7)$$

由于同胚映射圆曲线 l_{ef} 段与 $l_{e'f'}$ 段弧长相同, l_{ef} 段所对应同胚映射圆角 θ 为

$$\theta = \frac{\int_0^{\theta'} \sqrt{(a \sin \theta')^2 + (b \cos \theta')^2} d\theta'}{r} \quad (8)$$

则点 f' 在螺旋线上的 Z 轴坐标为

$$z = \frac{H\theta}{2\pi} = \frac{H \int_0^{\theta'} \sqrt{(a \sin \theta')^2 + (b \cos \theta')^2} d\theta'}{2\pi r} \quad (9)$$

式中 H ——椭圆柱面螺旋线的螺距, mm

联立式(2)、(9)得出椭圆柱面螺旋线即割胶轨迹方程为

$$\begin{cases} x = a\cos\theta' \\ y = b\sin\theta' \\ z = \frac{H\int_0^{\theta'} \sqrt{(a\sin\theta')^2 + (b\cos\theta')^2} d\theta'}{2\pi r} \end{cases} \quad (10)$$

2.2.2 割胶传动机构设计

割胶轨迹直接影响剖面平整性,决定割胶质量^[6]。规划割胶运动时,采用常规半树周隔日割胶制度,即刀具在椭圆方向上和竖直方向上的运动距离分别为 $H/2$ 和 $L/2$,设刀具在 x 方向和 y 方向的运动速度分别为 v_r 和 v_y ,刀具螺旋升角为 λ 。

由图 4 可知

$$\frac{v_y}{v_r} = \frac{H}{L} = \tan\lambda \quad (11)$$

式中 L ——椭圆周长,mm

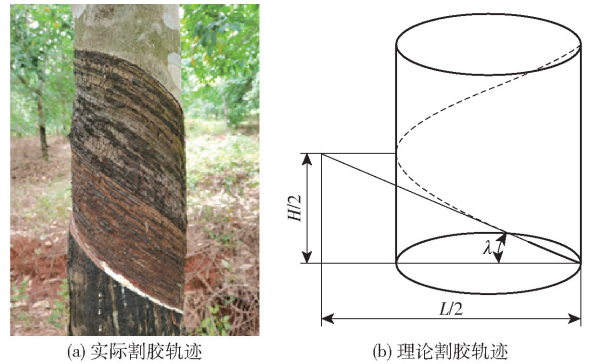


图 4 割胶轨迹示意图

Fig.4 Schematics of tapping trajectory

将割胶轨迹即椭圆柱面螺旋线分化为平面椭圆运动和竖直运动,通过减速步进电机带动圆柱齿轮与齿型同步带配合传动实现椭圆方向运动,通过减速步进电机带动丝杠传动实现竖直方向运动,具体机构如图 5 所示。

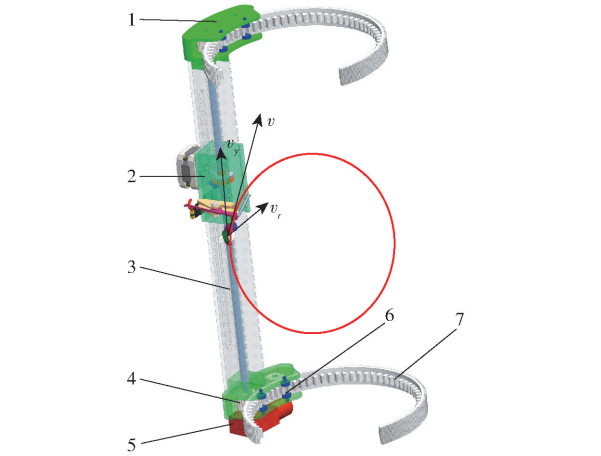


图 5 割胶传动机构示意图

Fig.5 Schematic of transmission mechanism for rubber tapping

1. 末端执行器安装滑块架 2. 丝杠螺母 3. 丝杠 4. 圆柱齿轮
5. 减速步进电机 6. 辅助滚轮 7. 齿型同步带

综上可得

$$v_r = \frac{\omega d}{2} = \frac{\omega m z_1}{2} \quad (12)$$

$$v_y = \frac{\omega p}{2\pi} \quad (13)$$

式中 d ——圆柱齿轮分度圆直径,mm

m ——圆柱齿轮模数,mm

p ——丝杠导程,mm

z_1 ——圆柱齿轮齿数

ω ——减速步进电机转动角速度,rad/s

由式(12)、(13)可知

$$\tan\lambda = \frac{p}{\pi m z_1} \quad (14)$$

选用丝杠导程 p 为 16 mm,圆柱齿轮模数 m 为 1 mm,通过调整圆柱齿轮齿数 z_1 来改变刀具螺旋升角 λ ,关系如表 1 所示。

表 1 齿数与螺旋升角关系

Tab.1 Relationship between number of teeth and helix angle

z_1	14	11	9
$\lambda/(^{\circ})$	20.0	24.8	29.5

2.2.3 割胶移位机构

割胶机完成割胶工作后,刀具部分在推杆的作用下完成收刀,末端执行器运动至起始点,此时由控制模块控制步进电机旋转,丝杠不动,通过安装于步进电机上的锥齿轮 I 与通过顶针固定于丝杠螺母上的锥齿轮 II 啮合传动,使末端执行器向下移动一定的位置,移动的高度即为割胶耗皮量,具体结构如图 6 所示。

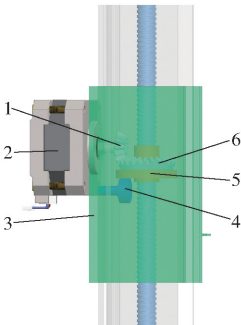


图 6 移位机构示意图

Fig.6 Schematic of shifting mechanism

1. 锥齿轮 II 2. 步进电机 3. 末端执行器安装滑块架 4. 同步滚轮
5. 丝杠螺母 6. 锥齿轮 I

2.3 割胶执行机构

割胶深度对割胶作业极为重要,割胶过深易伤树而过浅则直接影响乳胶产量,依据割胶技术规程中所规定的割胶生产技术指标,即割胶需要控制内切口与形成层之间的距离在 1.2 ~ 1.8 mm 之间。

2.3.1 仿形机构

传统割胶方式主要依靠人工肉眼识别橡胶树皮颜色来判断、控制割胶深度。现有割胶装备针对割胶深度控制主要采用两种方式：一种是仿形限深机构,通过增设限深或仿形机构限定割胶深度,以达到控制割胶深度的要求,避免伤树问题的产生;另一种是采用深度相机,通过对采集图像进行分析反馈,从而达到控制割胶深度的目的。后者成本较高,且对工作要求苛刻,目前主要采用仿形限深机构对割胶深度进行控制。

常见的仿形限深机构有导向轮和导向杆两种形式,仿形杆与橡胶树之间有滑动摩擦力 f_s ,所受阻力较大,反作用于刀架的力 F_n 直接影响割胶质量;导向轮与橡胶树之间有滚动摩擦力 f_d ,相比仿形杆所受摩擦力较小,对割胶执行机构的反作用力小,如图7所示。

在导向轮的基础上,改进与橡胶树之间的接触

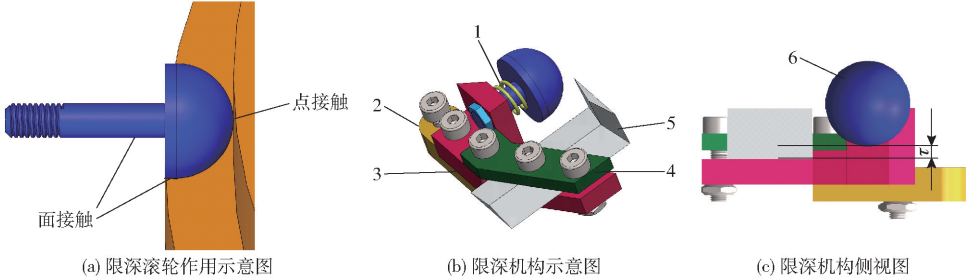


图8 限深机构示意图

Fig. 8 Schematics of depth limiting mechanism

1. 限深弹簧 2. 连接块 3. 刀具固定架 4. 压板 5. 割胶刀片 6. 限深滚轮

2.3.2 割胶刀结构参数和受力分析

考虑经济性和割胶刀的耐磨性,割胶刀选用硬

度为56HRC的钢质材料,经过热处理、定型工序,达到所需钢质硬度,割胶刀结构参数及受力分析见图9。

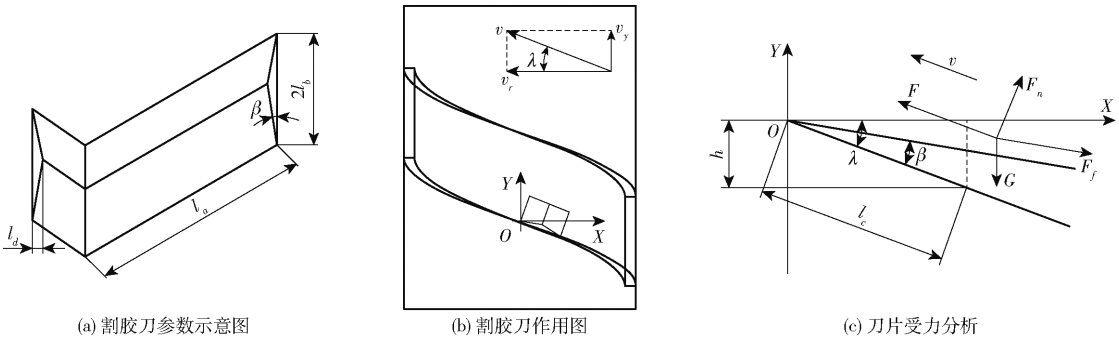


图9 割胶刀参数及受力分析

Fig. 9 Rubber tapping knife parameters and force analysis

利用达朗贝尔定理分析,则切入时割胶刀的受力应满足

$$\begin{cases} F\cos\beta - F_f - G\sin(\lambda - \beta) \geq 0 \\ F_n + F\sin\beta - G\cos(\lambda - \beta) = 0 \\ F_f = \mu F_n \\ \mu = \tan\varphi \end{cases} \quad (15)$$

式中 φ ——割胶刀与橡胶树皮间的摩擦角, ($^{\circ}$)
 F ——割胶刀切入橡胶树的力, N
 G ——割胶刀自重, N
 F_f ——割胶刀所受摩擦力, N
 β ——割胶刀的夹角, ($^{\circ}$)
 μ ——割胶刀与橡胶树皮间的摩擦因数
根据图9c中的几何关系可得

$$\begin{cases} \sin\beta = \frac{l_d}{\sqrt{l_b^2 + l_d^2}} \\ \cos\beta = \frac{l_b}{\sqrt{l_b^2 + l_d^2}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \sin(\lambda - \beta) = \frac{h}{l_c} \\ \cos(\lambda - \beta) = \frac{\sqrt{l_c^2 - h^2}}{l_c} \end{cases} \quad (17)$$

式中 l_a ——割胶刀切割树皮长度,即割胶深度,mm
 l_b ——割胶刀宽度的一半,mm
 l_c ——割胶刀切入橡胶树表皮长度,mm
 l_d ——割胶刀厚度,mm
 h ——割胶刀切入橡胶树表皮对应高度,mm
对式(15)进行简化可得

$$F_f \geq \frac{\tan\varphi [F(\sin\beta + \cos\beta) - G(\sin(\lambda - \beta) + \cos(\lambda - \beta))]}{1 - \tan\varphi} \quad (18)$$

将式(16)、(17)代入式(18)中可得

$$F_f \geq \frac{\tan\varphi}{1 - \tan\varphi} \left(F \frac{l_b + l_d}{\sqrt{l_b^2 + l_d^2}} - G \frac{\sqrt{l_c^2 - h^2} + h}{l_c} \right) \quad (19)$$

为保证割胶运动的连续性与稳定性,速度 v 需保持不变,因此割胶刀切入橡胶树表皮的力 F 也为定值。由式(18)可知影响割胶刀摩擦力 F_f 的主要因素为摩擦角 φ 和割胶刀螺旋升角 λ 。

2.3.3 割胶执行机构

仿形进阶式天然橡胶割胶机的割胶刀采用拉簧柔性连接方式,既可以为刀具切割橡胶树皮提供合适的预紧力,又能避免因刚性连接导致橡胶树水囊皮被割破。退刀时利用推杆带动收刀曲柄转动,确保割胶刀回至起割位置时不会与橡胶树发生干涉,割胶执行机构进刀、退刀示意图如图 10 所示。

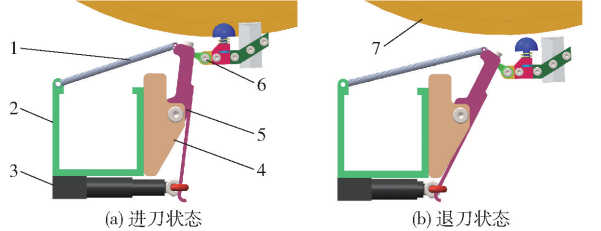


图 10 割胶执行机构示意图

Fig. 10 Schematics of rubber tapping execution mechanism

1. 拉簧 2. 末端执行器安装滑块架 3. 直流推杆 4. 收刀固定架 5. 收刀曲柄 6. 角度调节板 7. 橡胶树模型

收刀曲柄与角度调节板通过螺栓连接,通过改

变角度调节板的角度来调节割胶刀切入橡胶树的角度,以水平面为基准,角度调节板调节范围为 $25^\circ \sim 45^\circ$,适用于树围不同的橡胶树,如图 11 所示。角度调节板与刀具安装板固连,通过压板和螺栓将割胶刀固定在刀具安装板上。

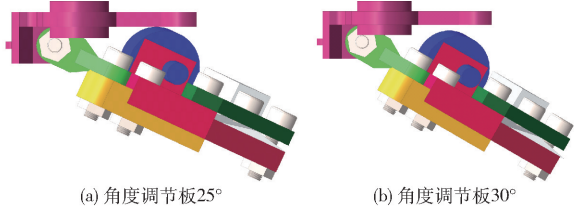


图 11 角度调节示意图

Fig. 11 Schematics of angle adjustment

2.4 驱动控制模块设计

控制部分^[36]采用 Arduino uno r3 开发板作为控制器^[37-38],通过 cnc shield v3 扩展板和 2 个 A4988 型驱动板驱动减速步进电机和步进电机运动,实现割胶运动机构的割胶运动和末端执行器的移位动作;通过 L298N 型直流电机驱动模块控制直流电机推杆运动,实现末端执行器的进刀和退刀动作。通过外接 12 V 直流电源为 Arduino uno r3 开发板和驱动模块供电,驱动电机工作,整机控制框图如图 12 所示。

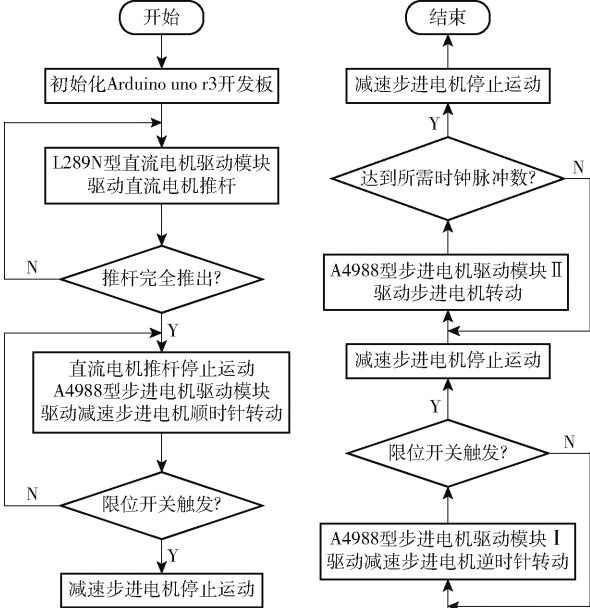


图 12 控制模块程序框图

Fig. 12 Block diagram of control module

选用 MNTG 型微型电动推杆进行进刀、退刀动作,最大推拉力 60 N,输入电压为 12 V 直流电压,推杆行程 30 mm,内置限位开关确保机器运行的准确性。

选用 HST42H4812-49k-04 型两相四线减速步进电机和 35BYGH 型步进电机分别作为割胶运

动的动力输入和移位运动的动力输入,步距角 1.8° ,额定电压12 V 直流电压,为保证割胶机的运动稳定性和精准性,采用细分驱动的方式,通过A4988 型驱动模块将减速步进电机的细分数设置为半细分,即400 个脉冲步进电机转动一圈。为避免接线混乱与信号的干扰,整机采用12 V 直流电源供电。为保证割胶机能在林间长时间工作,以电动割胶刀单次割胶耗电量为参考值,电源选用5 600 mA·h 锂电池。

3 林间试验

为验证割胶机割胶性能,于2021 年6 月于海南大学天然橡胶试验地进行割胶作业试验,随机选择20 棵生长年份及树围不同的橡胶树,对每棵树进行5 组试验,割胶机试验现场如图13 所示。



图13 割胶机试验现场

Fig. 13 Field test of rubber cutting machine

3.1 试验方案

固定式割胶机用于实际生产时,需要在整个生产期间均安装于橡胶树上,因此固定式割胶机不仅需要较好的割胶质量,还必须具备较强的续航能力,因此,试验重点对割胶机割胶质量和耗电量进行测试。割胶质量通常以割胶面的平整性来衡量,由于割胶工作结束后橡胶树产出的天然乳胶影响对割胶面的观测,因此,割胶质量采用前5 min 排胶量来衡量^[13];同样,取5 次割胶试验耗电量的平均值为衡量割胶功耗的指标。

经预试验可发现影响割胶机前5 min 排胶量和耗电量的因素主要有电机转速 η 、刀具螺旋升角 λ 和拉簧预紧力 F_1 。经人工割胶速度换算得电机转速范围为15 ~ 25 r/min,割胶机采用阳刀割胶方法,割胶角度即刀具螺旋升角为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$;预试验发现拉簧预紧力为10 ~ 30 N 时,有较好的贴树仿形功能。

采用三因素三水平试验,试验因素编码见表2。

表2 试验因素编码
Tab.2 Coding of test factors

编码	因素		
	$\eta/(r \cdot \min^{-1})$	$\lambda/(^{\circ})$	F_1/N
-1	17	20	15
0	21	25	20
1	25	30	25

选用 $L_3(3^3)$ 正交表,试验方案见表3, A 、 B 、 C 为因素编码值,采用完全随机试验设计。

表3 试验方案和结果
Tab.3 Test scheme and results

序号	因素			前5 min 排胶量 Y_1/mL	平均耗电量 $Y_2/(W \cdot h)$
	A	B	C		
1	0	0	0	6.29	1.04
2	-1	-1	0	5.55	0.96
3	0	0	0	6.34	1.01
4	1	1	0	7.15	1.43
5	-1	1	0	6.32	1.42
6	0	1	-1	6.15	1.51
7	0	1	1	5.89	1.55
8	1	0	1	6.12	1.15
9	-1	0	1	5.02	1.27
10	0	0	0	6.23	1.02
11	1	-1	0	7.04	0.80
12	0	-1	1	5.53	0.99
13	0	0	0	6.24	1.09
14	-1	0	-1	5.16	1.16
15	1	0	-1	6.38	1.15
16	0	0	0	6.29	1.07
17	0	-1	-1	5.75	0.88

应用 Design-Expert 软件 Box - Behnken 试验设计模块对试验结果进行回归拟合分析,可得前5 min 排胶量和平均耗电量的二次多项式回归模型为

$$Y_1 = 6.28 + 0.58A + 0.20B - 0.11C - 0.16AB - 0.030AC - 0.010BC + 0.039A^2 + 0.20B^2 - 0.65C^2 \tag{20}$$

$$Y_2 = 1.05 - 0.035A + 0.29B + 0.033C + 0.042AB - 0.028AC - 0.017BC + 0.028A^2 + 0.078B^2 + 0.11C^2 \tag{21}$$

由表4、5 可知,两回归模型的 P 值均小于0.000 1,表明回归模型高度显著;模型失拟项的 P 值均大于0.05,表明模型失拟性不显著,回归模型拟合程度高。由电机转速、刀具螺旋升角、拉簧预紧力的 P 值可判断3 个试验因素对割胶前5 min 排胶量和平均耗电量影响均极显著或显著。由表4 可得试验因素对前5 min 排胶量影响从大到小依次为电机转速、刀具螺旋升角、拉簧预紧力。由表5 可得试验因素对平均耗电量影响从大到小依次为刀具螺旋

升角、电机转速、拉簧预紧力。前 5 min 排胶量回归模型和平均耗电量回归模型的 P 值小于 0.05,表明这 3 个回归项在回归模型中交互影响显著;两模型的 决定系数 R^2 分别为 0.998 0 和 0.992 2,表明有 99.80% 和 99.22% 试验差异可用该模型解释,与实际数据的拟合程度高;校正决定系数 R^2_{adj} 分别为 0.995 3 和 0.982 2,与 R^2 非常接近 1,表明相关性较好;变异系数和精度分别为 0.64%、2.56% 和 71.606、33.012,说明前 5 min 排胶量和平均耗电量具有较高的可靠性。

表 4 前 5 min 排胶量二次多项式模型的方差分析
Tab.4 Variance analysis of quadratic polynomial model of rubber discharge in the first five minutes

方差源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	5.11	9	0.57	379.39	<0.000 1**
A	2.69	1	2.69	1797.56	<0.000 1**
B	0.34	1	0.34	224.56	<0.000 1**
C	0.097	1	0.097	64.66	<0.000 1**
AB	0.11	1	0.11	72.74	<0.000 1**
AC	3.6×10^{-3}	1	3.6×10^{-3}	2.40	0.164 9
BC	4.0×10^{-4}	1	4.0×10^{-4}	0.27	0.621 2
A^2	6.241×10^{-3}	1	6.241×10^{-3}	4.17	0.080 5
B^2	0.17	1	0.17	110.81	<0.000 1**
C^2	1.76	1	1.76	1175.47	<0.000 1**
残差	0.010	7	1.497×10^{-3}		
失拟项	2.60×10^{-3}	3	8.667×10^{-4}	0.44	0.737 1
纯误差	7.88×10^{-3}	4	1.97×10^{-3}		
总和	5.12	16			

注: ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$),下同。

表 5 平均耗电量二次多项式模型的方差分析
Tab.5 Variance analysis of quadratic polynomial model of average power consumption

方差源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.76	9	0.085	98.83	<0.000 1**
A	9.80×10^{-3}	1	9.8×10^{-3}	11.40	0.011 8*
B	0.65	1	0.65	755.58	<0.000 1**
C	8.45×10^{-3}	1	8.45×10^{-3}	9.83	0.016 5*
AB	7.225×10^{-3}	1	7.225×10^{-3}	8.40	0.023 0*
AC	3.025×10^{-3}	1	3.025×10^{-3}	3.52	0.102 8
BC	1.225×10^{-3}	1	1.225×10^{-3}	1.42	0.271 6
A^2	3.36×10^{-3}	1	3.36×10^{-3}	3.91	0.088 6
B^2	0.026	1	0.026	29.98	0.000 9**
C^2	0.049	1	0.049	57.37	0.000 1**
残差	6.02×10^{-3}	7	8.6×10^{-3}		
失拟项	1.50×10^{-3}	3	5.0×10^{-3}	0.44	0.735 5
纯误差	4.52×10^{-3}	4	1.13×10^{-3}		
总和	0.77	16			

注: * 表示影响显著 ($P < 0.05$)。

3.2 试验结果与分析

根据回归模型分析结果,利用 Design-Expert 软

件绘制各因素交互影响 3D 响应曲面。电机转速和刀具螺旋升角对前 5 min 排胶量响应曲面如图 14a 所示,刀具螺旋升角由 20°增加到 30°过程中,刀具螺旋升角越大,天然乳胶所受下滑分力也越大,前 5 min 排胶量也越多,刀具螺旋升角越小,天然乳胶所受下滑分力也越小,前 5 min 排胶量也越少;电机转速和刀具螺旋升角对平均耗电量的响应曲面如图 14b 所示,刀具螺旋升角由 20°增加到 30°过程中,功耗为阻力与距离的乘积,刀具螺旋升角越大,割胶轨迹越长,平均耗电量也增加,刀具螺旋升角越小,割胶轨迹越短,平均耗电量也减小;电机转速由 17 r/min 增加到 25 r/min 过程中,电机转速越大,平均耗电量越多,电机转速越小,平均耗电量越少。由图 14 结合林间试验数据可得,当电机转速 21 r/min、刀具螺旋升角 25°时,前 5 min 排胶量为 6.29 mL、平均耗电量 1.07 W·h,此时为割胶机的最佳参数组合。

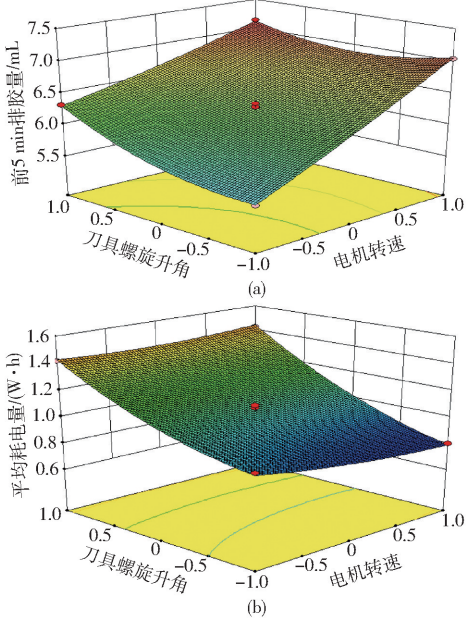


图 14 交互效应响应曲面 ($C = 0$)
Fig. 14 Interaction response surface

4 结论

- (1)设计了一种仿形进阶式天然橡胶割胶机,通过对单一减速步进电机实现割胶复合运动的设计,一次作业可实现进刀、退刀、割胶等工序,提高天然橡胶的生产效率以及降低割胶对橡胶树的损伤率。
- (2)对割胶轨迹进行理论分析,将空间螺旋运动分解为二维的复合运动,竖直运动采用丝杠传动的方式,椭圆运动采用圆柱齿轮啮合传动的方式,分析竖直运动和椭圆运动的关系,确定合适的刀具螺旋升角与圆柱齿轮模数、齿数和丝杠导程。
- (3)进行林间割胶试验,应用 Box - Behnken 试

验设计模块确定3个显著影响因素最优值:电机转速21 r/min、刀具螺旋升角25°、拉簧预紧力20 N。以最优参数组合得到的前5 min排胶量为6.29 mL、平均耗电量为1.07 W·h。

参 考 文 献

[1] MARYAM S, KATRINA C, MOSLEM B, et al. Natural rubber-producing sources, systems, and perspectives for breeding and biotechnology studies of *Taraxacum kok-saghyz*[J]. *Industrial Crops & Products*, 2021, 170:113667.

[2] ISABELA D, LIGIA R, MARIA 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] THIERRY M, JEAN-MARIE E, RÉGIS L, et al. Tapping panel diagnosis, an innovative on-farm decision support system for rubber tree tapping[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32: 791 – 801.

[4] AMOL V, VIPAN G. Standardized gum tapping techniques to maximize yield from high-value Indian tree, *Sterculia urens*[J]. *Journal of Forestry Research*, 2017, 28(3): 615 – 619.

[5] 曹建华, 张以山, 王玲玲, 等. 天然橡胶便携式采胶机械研究[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(8): 20 – 27.
CAO Jianhua, ZHANG Yishan, WANG Lingling, et al. Research on portable tapping machine for natural rubber harvesting [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(8): 20 – 27. (in Chinese)

[6] SUPAPORN M, BOONSIN T, VIRASAKDI C. Musculoskeletal problems and ergonomic risk assessment in rubber tappers: a community-based study in southern Thailand[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2012, 42: 129 – 135.

[7] 曾霞, 黄华孙. 我国天然橡胶技术发展现状与展望[J]. *中国热带农业*, 2021(1): 25 – 30.
ZENG Xia, HUANG Huasun. Development and prospects of natural rubber technology in China [J]. *China Tropical Agriculture*, 2021(1): 25 – 30. (in Chinese)

[8] DENGLE Y, EVELYN M, SUNDAY F. Analysis of improved production practices in small holder natural rubber plantation for sustainable natural rubber industry in nigeria[J]. *Natural Products Chemistry & Research*, 2021, 9(5):1000394.

[9] 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)

[10] 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)

[11] 隋斌, 张庆东, 张正尧. 论乡村振兴战略背景下农业工程科技创新[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 1 – 10.
SUI Bin, ZHANG Qingdong, ZHANG Zhengyao. Science and technology innovation in agricultural engineering under background of rural revitalization strategy[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(4): 1 – 10. (in Chinese)

[12] RATTACHAI W, THANATE K. Nighttime rubber tapping line detection in near-range images[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80: 29401 – 29422.

[13] 汝绍锋, 李梓豪, 梁栋, 等. 天然橡胶树割胶技术的研究及进展[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(2): 27 – 31.
RU Shaofeng, LI Zihao, LIANG Dong, et al. Progress in the resrarch of tapping technology of natural rubber tree[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(2): 27 – 31. (in Chinese)

[14] 王伟伟, 陈黎卿, 杨洋, 等. 农业机械底盘技术研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(8): 1 – 15.
WANG Weiwei, CHEN Liqing, YANG Yang, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(8): 1 – 15. (in Chinese)

[15] SOUMYA S J, VISHNU R S, ARJUN R N, et al. Design and testing of a semi automatic rubber tree tapping machine (SART) [C]//Agra: 2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10 – HTC). IEEE, 2017.

[16] MORO A P, ADOU B Y C, DIARRASSOUBA M, et al. Quantitative assessment of the agro-physiological advantages of upward tapping in relation to the downward tapping of the GT 1 and PB 260 rubber clones [*Hevea brasiliensis*, Muell. arg. (Euphorbiaceae)] in southwest Côte d'Ivoire[J]. *Journal of Experimental Agriculture International*, 2021, 43(2): 94 – 104.

[17] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 277 – 293.
ZHAO Chunjiang. Advances of research and application in remote sensing for agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12): 277 – 293. (in Chinese)

[18] HUANG H, LIU Y J. Hardness test and analysis on hand-pushed natural rubber tapping knife [C] // 2015 International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering (AMEE 2015), Phuket Thailand, 2015.

[19] SU Ming. Electric tapping knife: WO2019161800[P]. 2019 – 08 – 29.

[20] ZHOU Hang, ZHANG Shunlu, ZHANG Junxiong, et al. Design development and field evaluation of a rubber tapping robot [J]. *Journal of Field Robotics*, 2021, 39(1): 1 – 27.

[21] 张喜瑞, 曹超, 张恒, 等. 一种履带式割胶机器人: CN113303196A[P]. 2021 – 08 – 27.

[22] 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)

- [23] ABHILASH K S, BABU V V S, RAHMAN A N, et al. Investigative study on the feasibility of simultaneous movement along multiple axes for helical cut using RTM[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45(2): 3422–3425.
- [24] SUSANTO H, ALI S. The design of flexible rubber tapping tool with settings the depth and thickness control[C]//IOP (Conference) Series: Materials Science and Engineering, 2019: 12002.
- [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] 曾宏伟, 雷军波, 陶建峰, 等. 基于单目视觉的谷物联合收获机产量测量方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 281–289.
ZENG Hongwei, LEI Junbo, TAO Jianfeng, et al. Yield monitoring for grain combine harvester based on monocular vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 281–289. (in Chinese)
- [27] 张慧春, 周宏平, 郑加强, 等. 植物表型平台与图像分析技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 1–17.
ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang, et al. Research progress and prospect in plant phenotyping platform and image analysis technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 1–17. (in Chinese)
- [28] 周俊, 何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 1–14.
ZHOU Jun, HE Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 1–14. (in Chinese)
- [29] 罗庆生, 许仕杰, 李凯林. 便携式自动割胶机器人结构设计 with 静力学分析[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(11): 201–205.
LUO Qingsheng, XU Shijie, LI Kailin. Structural design and static analysis of a portable automatic rubber cutting robot[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(11): 201–205. (in Chinese)
- [30] MD K, NURSHAZWANI W, RAZALI M, et al. Design of automated rubber tapping mechanism[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020: 012016.
- [31] 汪雄伟, 耿贵胜, 李福成, 等. 固定式全自动智能控制橡胶割胶机设计[J]. 农业工程, 2020, 10(7): 79–84.
WANG Xiongwei, GENG Guisheng, LI Fucheng, et al. Design of fixed automatic intelligent control rubber tapping machine [J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(7): 79–84. (in Chinese)
- [32] 高可可, 孙江宏, 高峰, 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)
- [33] ZHANG Shunlu, ZHANG Chunlong, ZHANG Junxiong, et al. Design and experiment of suspension-typed rubber tapping device[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(3): 110–118.
- [34] 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)
- [35] 中华人民共和国农业农村部. 橡胶树割胶技术规程: NY/T 1088—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [36] 赵春江, 魏传省, 付卫强, 等. 静液压传动拖拉机定速巡航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 359–365.
ZHAO Chunjiang, WEI Chuansheng, FU Weiqiang, et al. Design and experiment of cruise control system for hydrostatic transmission tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 359–365. (in Chinese)
- [37] SANDEEP V G, AMOL D V, KARBHARI V K, et al. An innovative IoT based system for precision farming[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106291.
- [38] 华洪良, 廖振强, 陈勇将, 等. 面向夹持机构的紧凑型串联弹性力控驱动器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 426–432, 442.
HUA Hongliang, LIAO Zhenqiang, CHEN Yongjiang, et al. Design and control of compact series elastic force actuator for grasping mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 426–432, 442. (in Chinese)