

# 激光测距控深割胶机设计与试验

刘俊孝<sup>1,2</sup> 孙瑶瑶<sup>1</sup> 张喜瑞<sup>1</sup> 张志富<sup>1</sup> 张丽娜<sup>1,3</sup> 孙鹤鸣<sup>1</sup>

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 海南大学三亚研究院, 三亚 572025;

3. 海南大学信息与通信工程学院, 海口 570228)

**摘要:** 针对目前割胶机械割深不均匀、树皮起伏适应能力差等问题,设计一种激光测距控深割胶机,通过构建数学模型分析割胶作业中的轨迹动态,得到轨迹解析方程。基于割胶执行机构与橡胶树的几何关系确定割胶刀距离调整计算方法,明确测距点间隔角度对割胶刀调整误差的影响机制,利用 Arduino 控制板实现了割胶过程中的轨迹行走和刀具精准控制。以位移电机转速、耗皮量与切割深度阈值为试验因素,以单次割胶刀具调整次数、压力方差和切割深度合格率为评价指标,进行正交试验。试验结果表明:位移电机转速 24 r/min、不同耗皮量和切割深度阈值设定范围条件下,切割深度合格率均可达到 87%,当位移电机转速为 24 r/min、耗皮量为 1.3 mm、切割深度阈值为  $-0.1 \sim 0.1$  mm 时取得最优割胶效果,切割深度合格率为 95.74%,平均刀具调整次数为 22.33 次,压力方差为  $14.89 \text{ N}^2$ ,且割面平滑度较好,满足割胶作业要求。

**关键词:** 天然橡胶; 割胶机; 激光测距; 割深控制

中图分类号: S225.93

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)04-0284-09

OSID:



## Design and Experiment of Laser Ranging Depth Control Rubber Tapping Machine

LIU Junxiao<sup>1,2</sup> SUN Yaoyao<sup>1</sup> ZHANG Xirui<sup>1</sup> ZHANG Zhifu<sup>1</sup> ZHANG Li'na<sup>1,3</sup> SUN Heming<sup>1</sup>

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

2. Sanya Research Institute of Hainan University, Sanya 572025, China

3. School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of uneven cutting depth and poor adaptability of bark undulation in rubber tapping machinery, a laser ranging and depth control rubber tapping machine was designed, and the trajectory dynamics in rubber tapping operation were analyzed by constructing a mathematical model, and the trajectory analysis equation was obtained. Based on the geometric relationship between the rubber tapping actuator and the rubber tree, the tool distance adjustment calculation method was determined, the influence mechanism of the distance angle of the ranging point on the adjustment error of the rubber tapping knife was clarified, and the trajectory walking and precise control of the tool in the rubber tapping process were realized by using the Arduino control board. The orthogonal test was carried out with the speed of the displacement motor, the skin consumption and the threshold range of cutting depth as the test factors, and the number of adjustment times, pressure variance and cutting depth qualification rate of a single rubber tapping tool were used as evaluation indicators. The test results showed that under the conditions of the speed of the displacement motor was 24 r/min, different skin consumption and threshold setting range, the pass rate of cutting thickness can reach more than 87%, which was the best rubber tapping effect when the speed of the displacement motor was 24 r/min, the skin consumption was 1.3 mm, and the threshold range of tapping depth was  $-0.1 \sim 0.1$  mm, the pass rate of tapping thickness was 95.74%, the average number of tool adjustments was 22.33 times, the pressure variance was  $14.89 \text{ N}^2$ , and the smoothness of the cutting surface was good, which met the requirements of tapping depth control.

**Key words:** natural rubber; rubber tappers; laser ranging; tapping depth control

收稿日期: 2024-11-15 修回日期: 2024-12-13

**基金项目:** 三亚市科技创新专项(2022KJCX94)、海南省自然科学基金项目(523RC440)、国家自然科学基金项目(U23A20176)、海南省科技人才创新项目(KJRC2023C04)、海南省高等学校科学研究项目(Hnky2022-9)、国家天然橡胶产业技术体系项目(CARS-33-JX2)和海南大学科研启动基金项目(KYQD(ZR)-22036)

**作者简介:** 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

**通信作者:** 张丽娜(1996—),女,讲师,博士后,主要从事机电一体化、农业信息与电子工程研究,E-mail: 2271426674@qq.com

0 引言

天然橡胶是一种重要的战略物资,我国高度重视橡胶产业发展,但近年来受种植收益低下、胶工荒等因素影响,我国天然橡胶自给率持续下降,进口依赖程度不断提高<sup>[1-4]</sup>。天然橡胶主要通过半螺旋环切橡胶树获取<sup>[5-9]</sup>,目前基本依赖人工割胶,技术要求高,劳动强度大且效率低<sup>[10-12]</sup>,割胶问题已成为制约天然橡胶产量的核心因素。

目前机械化割胶装备主要有电动割胶刀、自动割胶机、割胶机器人 3 种。电动割胶刀通过电机驱动刀片配合人工完成割胶工作,如中国热带农业科学院研发的 4GXJ 型电动割胶刀<sup>[13-15]</sup>,可提升割胶效率 10% 以上,能在一定程度上降低劳动强度,但仍需人工操作。

割胶机器人可在林间行走完成割胶工作,如文献<sup>[16-17]</sup>提出了一种轨道式割胶机器人,通过标签识别对橡胶树进行定位,借助六轴机械臂进行割胶工作,可以实现自主割胶。研究难点主要集中在割胶轨迹识别<sup>[18-19]</sup>和路径规划<sup>[20-22]</sup>,割胶机器人装备利用率高,但胶林地形复杂、技术难度较大,目前还处在研发起步阶段<sup>[23-26]</sup>。

自动割胶机固定在橡胶树上,通过手机 APP 远程预约可实现全自动割胶,如温翔宇等<sup>[27]</sup>研发了一种自动割胶机,通过不同电机实现割胶执行机构移动,通过机械仿形实现割胶过程控深。张喜瑞等<sup>[28]</sup>研发的仿形进阶式天然橡胶自动割胶机,采用直流推杆完成割胶机的进刀退刀动作,采用限深滚轮进行仿形割胶,经过试验验证,割胶效果较好。该模式胶工只需负责收胶即可,可彻底解决胶工短缺的问题<sup>[29-30]</sup>。

综上所述,目前可实现全自动割胶的装备主要为自动割胶机和割胶机器人,但割胶机器人短时间内无法大规模使用,自动割胶机具备结构简单、使用方便、割胶质量好等优点,对推动天然橡胶自动化割胶装备发展具有重要意义。

割胶深度控制是割胶的核心难题,现有仿形方法多为机械仿形,在表面平整的橡胶树割胶时效果较好,但针对树皮表面情况不佳、存在较大凹凸起伏情况时的割胶效果不佳。

为解决现存问题,本文设计一种激光测距控深割胶机,通过激光测距传感器实时测量树面情况,配合电机实现割胶过程中的刀具进给控制,实现割胶刀深度的自适应调整。并通过割胶机性能试验,明确激光测距控深割胶机的最佳工作参数,以期为新 型天然橡胶割胶机具设计提供参考。

1 整机结构与工作过程

1.1 割胶机整体结构

激光测距控深割胶机主要由柔性固定轨道、激光测距割胶执行机构、割胶机传动机构和整机控制模块组成,如图 1 所示。

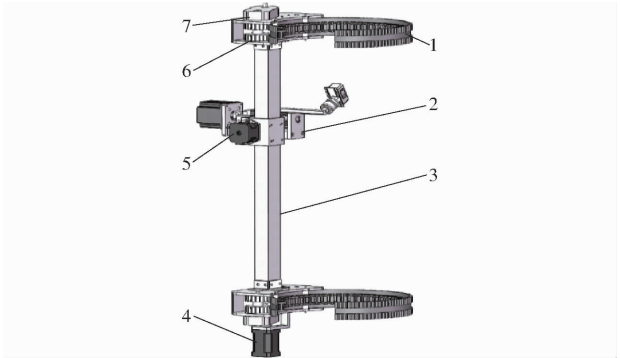


图 1 整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of whole machine

1. 柔性固定轨道 2. 割胶执行机构 3. 中轴支撑架 4. 位移电机 5. 纵向移动电机 6. 周向运动齿轮 7. 减速箱

柔性固定轨道采用高分子材料制作而成,可通过绑带将割胶机固定在橡胶树上,轨道可进行伸展,能适应不同树围,轨道外表面为齿形圈,可与周向运动齿轮进行啮合,实现割胶机的周向运动。割胶执行机构主要由激光测距传感器、压力传感器、刀台、刀具进给装置构成,割胶传动机构主要由丝杆、减速箱和周向运动齿轮构成,通过位移电机带动丝杆转动实现割胶执行机构沿中轴支撑架的竖直运动,丝杆带动减速箱和齿轮转动,实现割胶机周向运动,可通过改变减速箱减速比调整割胶轨迹倾角,割胶机单次割胶工作完成后,通过纵向移动电机实现耗皮量控制,整机控制模块主要由电源装置和 Arduino 控制板构成,割胶机通过控制板控制激光测距传感器和压力传感器进行测量并采集相关数据,根据控制原理计算出刀具调整距离,控深电机根据调整距离进行正反转实现进刀深度调整。

1.2 工作过程

割胶机通过柔性固定导轨固定在橡胶树上,当割胶机接收到割胶指令后,割胶工作开始,通过控制割胶机传动机构,带动割胶执行机构沿着橡胶树干做螺旋上升运动,实现沿割胶轨迹行走。割胶时激光测距传感器进行距离测量,根据割胶刀调整原理控制电机工作,将刀-树距离约束在最佳范围之内,前端的割胶刀安装机构与压力传感器结合可以实时测量割胶刀受力情况,当遇到阻碍或者割深控制不均时割胶刀受力会发生突变,根据割胶刀受力情况可以判断割胶过程的平稳性,当割胶结束时割胶传

动机构带动割胶执行机构退回至原点,并在纵向移动电机带动下,下降一定高度到达下一次工作起点。

1.3 关键部件设计

1.3.1 传动机构

割胶过程是通过切破橡胶树乳管,使其内乳胶流出的过程,刀具沿树皮表面进行螺旋运动,割胶轨迹如图 2 所示,图中  $\alpha$  为割胶倾角, ( $^{\circ}$ );  $H$  为割胶高度, mm;  $R_1$  为树干半径, mm;  $h$  为耗皮量, mm。为便于计算,可以将橡胶树树干看作是一个规则的圆柱体,割胶轨迹就可以看作是在圆柱体面上的一条左螺旋线,这条螺旋线展开后是以圆柱底面周长为底边、导程为高的直角三角形的斜边。

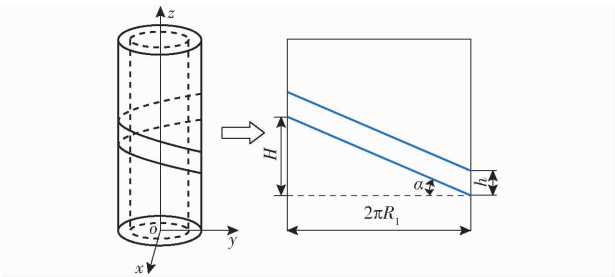


图 2 割胶轨迹模型

Fig. 2 Tapping trajectory model

根据图 2 可得

$$\alpha = \arctan \frac{H}{2\pi R_1} \tag{1}$$

以圆柱底面圆心为坐标原点建立  $xoy$  笛卡尔坐标系,螺旋线参数方程为

$$\begin{cases} x = R_1 \cos(\omega t_0) \\ y = R_1 \sin(\omega t_0) \\ z = \frac{H}{2\pi} \omega t_0 \end{cases} \tag{2}$$

式中  $\omega$ ——圆柱体自转角速度, rad/s  
 $t_0$ ——运动时间, s

割胶机整机传动机构主要作用为带动割胶执行机构完成割胶轨迹的稳定行走,割胶机整机传动主要由柔性固定轨道和丝杠模组组成,割胶机通过柔性固定轨道固定在树干上,柔性固定轨道外部有齿圈与割胶机两端的齿轮进行啮合,位移电机转动带动齿轮正反转从而使割胶机沿着柔性固定轨道外围进行圆周运动,在进行圆周运动的同时丝杠的转动会带动割胶执行机构进行纵向运动,圆周运动和纵向运动的轨迹复合使割胶执行机构沿着割胶轨迹进行螺旋运动。

周向运动齿轮与齿轮减速箱连接,通过调整减速箱速比可以改变齿轮转速和丝杠转速比例,从而改变执行机构螺旋运动倾角,整机割胶速度通过位移电机进行控制。速度计算公式为

$$\begin{cases} v_r = mz_1 \pi \frac{n_0}{60c} \\ v_y = \frac{pn_0}{60} \end{cases} \tag{3}$$

式中  $c$ ——减速箱速比  $z_1$ ——齿数  
 $p$ ——丝杠导程, mm  $m$ ——模数, mm  
 $n_0$ ——位移电机转速, r/min  
 $v_r$ ——圆周运动速度, mm/s  
 $v_y$ ——纵向移动速度, mm/s

根据式(3)可得割胶倾角正切表达式为

$$\tan \alpha = \frac{v_y}{v_r} = \frac{cp}{mz_1 \pi} \tag{4}$$

根据 NY/T 1088—2020《橡胶树割胶技术规范》,阳刀割胶的割线倾角为  $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,实际割胶作业结果显示,割胶倾角增加有助于提升流胶速度,缩短流胶时间,故本割胶机设计选用最大割胶倾角,根据上述割胶倾角计算方法,割胶机传动齿轮模数为 2.5 mm,丝杠导程为 4 mm,减速箱速比为 25,割胶时间计算式为

$$t = \frac{1\,500R_1}{mz_1 n_0} = \frac{300R_1}{11n_0} \tag{5}$$

式中  $t$ ——割胶时间, s

1.3.2 割胶执行机构

割胶执行机构的主要功能为控制割胶深度和切割树皮,现有割胶机主要采用机械仿形方法实现割胶深度控制,割胶精度受树皮表面情况影响较大。选用激光测距传感器进行深度控制,相较于超声波传感器,激光测距传感器拥有更好的单点精度,测量精准度更高。割胶执行机构主要由激光测距传感器、刀具安装架、压力传感器和割胶刀进给装置构成(图 3),通过测距传感器获得刀尖与割胶目标位置的相对距离,与已设定的切割深度阈值范围进行比较,当距离超过设定阈值范围时,根据差值控制控制深电机转动,带动割胶刀到达目标点位置。割胶刀进给装置主要由丝杠模组组成,通过丝杠正反转控制刀具前后运动,电机采用 42 电机,根据目标距离不同,调整脉冲数和脉冲间隔时间,使割胶刀及时到达指定位置。

割胶刀在割胶过程中沿割胶轨迹以一定速度  $V$  进行切屑,切割树皮宽度即耗皮量为  $h$ ,如图 4 所示。

割胶刀在切割树皮过程中受到的阻力变化对割胶过程稳定性和割胶效果具有很大的影响,割胶刀运动过程中的受力分析如图 5 所示,图中  $F$  为割胶刀切入橡胶树皮的力, N;  $G$  为割胶刀重力, N;  $F_f$  为割胶刀所受摩擦力, N;  $I$  为割胶刀切断树皮的力, N;

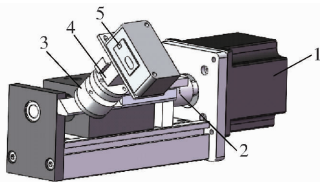


图 3 执行机构结构图

Fig.3 Overall diagram of actuator

1. 控深电机 2. 联轴器 3. 压力传感器 4. 刀台 5. 激光测距传感器

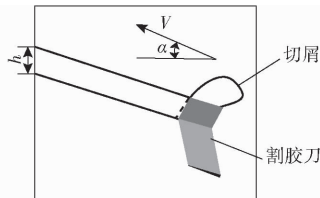


图 4 割胶示意图

Fig.4 Schematic of rubber tapping

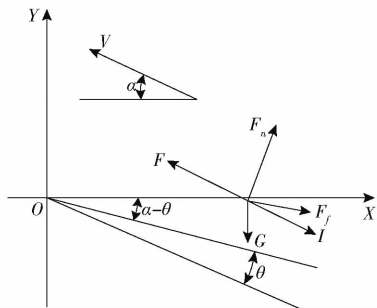


图 5 割胶刀力学分析示意图

Fig.5 Schematic of mechanical analysis of rubber tapping knife

$\theta$  为割胶刀夹角, ( $^{\circ}$ );  $F_n$  为割胶刀面所受压力, N。

割胶过程中割胶刀受力计算公式为

$$\begin{cases} (F - I) \cos \theta - F_f - G \sin(\alpha - \theta) = 0 \\ F_n + (F - I) \sin \theta - G \cos(\alpha - \theta) = 0 \\ F_f = \mu F_n \\ I = \sum_0^{h \cos \alpha} i \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\mu$ ——割胶刀与橡胶树皮间摩擦因数

$i$ ——单位长度切断树皮的力, N

根据式(6)可得割胶刀切入橡胶树皮的力  $F$  为

$$F = \frac{G \sin(\alpha - \theta + \arctan \mu)}{\sin(\theta + \arctan \frac{1}{\mu})} + \sum_0^{h \cos \alpha} i \quad (7)$$

由受力分析可知,在割胶倾角和割胶刀夹角不变的情况下,割胶刀切入橡胶树皮的力受耗皮量影响,为探明实际工作中耗皮量对割胶刀受力和工作稳定性的影响,在割胶执行机构前端安装压力传感器对割胶过程中的压力变化进行实时监测,选用的压力传感器型号为 HZC - 30B,测量范围为 0 ~ 30 kg,满足割胶过程中压力测量要求。在割胶过程

中割胶刀的受力变化被压力传感器测量并记录,根据压力数据的波动幅度可以对割胶稳定性进行相关分析。

## 2 控制原理分析与控制系统构建

### 2.1 控制原理分析

激光测距割胶机误差主要来源于激光测距传感器测量位置和割胶刀实际位置的偏差,将激光测距传感器安装位置设置在割胶刀下方可以减小横向安装距离带来的误差,但针对割胶轨迹上树皮存在的凸起和凹陷情况激光测距传感器无法及时获得数据,割胶机无法进行相应的调整导致割胶误差较大,所以本文选用将激光测距传感器安装在割胶刀前方,安装位置如图 6 所示,图中  $D_1$  为割胶刀与激光测距传感器沿出刀方向距离, mm;  $D_5$  为激光测距传感器与割胶刀横向距离, mm。在工作过程中激光测距传感器可以沿着预设的割胶轨迹进行距离测量,为适应不同树围导致的割胶轨迹偏差,传感器固定装置采用可调节式的固定方式,在安装割胶机时可以根据不同的树围需求调整传感器位置和角度以适应测量需求。选用的激光测距传感器型号为 LSD - S050MN,检测精度为 0.05 mm,满足割胶工作精度要求。

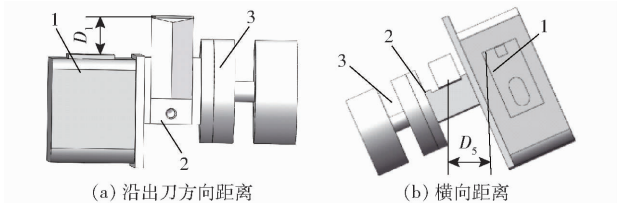


图 6 传感器与割胶刀距离示意图

Fig.6 Schematics of distance between sensor and tool

1. 激光测距传感器 2. 刀台 3. 压力传感器

根据割胶刀和激光测距传感器距离建立割胶过程中割胶执行机构与橡胶树几何关系模型,如图 7 所示,图中  $P_1$  为激光测距传感器位置;  $P_2$  为割胶刀位置;  $P_3$  为激光测距传感器测量位置;  $P_4$  为目标点位置;  $r$  为割胶目标半径, mm;  $D_2$  为目标点与圆心距离, mm;  $D_3$  为激光测距传感器测量距离, mm;  $D_4$  为激光测距测量点与目标点距离, mm;  $D_6$  为割胶刀与目标点横向距离, mm;  $D_7$  为测距点与目标点出刀方向的距离, mm;  $\beta$  为割胶刀到达目标点时转过的角度, ( $^{\circ}$ );  $L_1$  为调整角度对应的弦长, mm。通过模型分析明确割胶过程中割胶刀位置、传感器位置、测量点位置和目标点位置之间的几何关系,找出最佳的割胶刀调整距离计算方法,并结合割胶机运行速度公式,进一步推导得出割胶刀调整时间计算方法。

由图 7 可得相关距离关系表达式为

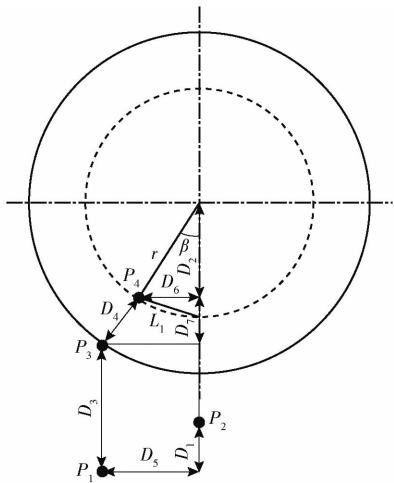


图 7 割胶过程几何关系示意图

Fig. 7 Schematic of geometric relationship of rubber tapping process

$$\begin{cases} D_2 = \sqrt{r^2 - D_6^2} \\ D_6 = D_5 \frac{r}{r + D_4} \\ D_7 = \frac{D_2(r + D_4)}{r} - D_2 \end{cases} \quad (8)$$

割胶刀与目标点距离  $D_i$  为

$$D_i = D_3 + D_7 - D_1 \quad (9)$$

联立式(8)、(9)可得割胶刀与目标点距离计算式为

$$D_i = D_3 + \frac{D_4}{r} \sqrt{r^2 - \left(\frac{D_5 r}{r + D_4}\right)^2} - D_1 \quad (10)$$

割胶刀到达目标点时转过的角度和对应弦长计算式为

$$\begin{cases} L_1 = D_5 \sqrt{\left(\frac{r}{r + D_4}\right)^2 + 1} = 2r \sin \beta \\ \beta = \arcsin \frac{L_1}{2r} \end{cases} \quad (11)$$

联立式(11)、(5)可得割胶刀到达激光测量位置时间

$$t_1 = \frac{5\beta R_1}{33n_0} = \frac{5R_1 \arcsin \frac{D_5 \sqrt{\left(\frac{r}{r + D_4}\right)^2 + 1}}{2r}}{33n_0} \quad (12)$$

式中  $t_1$ ——割胶刀到达激光测量位置时间, s

为保证在测量点位置时割胶刀已经到达目标点,割胶刀调节时间需小于等于  $t_1$ ,激光测距传感器位置与割胶刀距离可通过传感器安装板进行调整。为了降低能耗、减少电机调节次数,提升割胶机工作稳定性,在进行切割深度设定时留有一定阈值范围,在阈值范围内割胶机割胶刀位置不进行调整。

由于树体表面为圆柱曲线,激光测距 2 个测量

点之间的调整过程存在一定的深度误差,如图 8 所示,图中  $c_1$  为第 1 个目标点位置; $c_2$  为第 2 个目标点位置; $e$  为最大调整误差,mm。在割胶过程中两测量点距离间隔与割胶刀传感器间隔保持一致,在割胶刀到达上一次目标点位后传感器才会进行新的一次测量。选取最佳的测量间隔需对激光测距点间距和控制误差之间的关系进行几何分析。

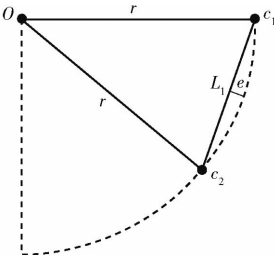


图 8 割胶误差示意图

Fig. 8 Schematic of rubber tapping error

根据误差几何关系可得误差计算公式为

$$e = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{L_1}{2}\right)^2} \quad (13)$$

将式(11)代入式(13)可得角度与误差关系式

$$\beta = \arccos \left( 1 - \frac{e}{r} \right) \quad (14)$$

根据计算结果可知,误差随间隔角度的减小而减小,但激光测距频率过高会增加割胶刀控制难度且增加机器功耗,为了在保证割胶精度的同时降低测距频率,对理想情况下不同树围的合理间隔角度进行计算,获得将最大调整误差控制在 0.5 mm 以内的间隔角度。根据 NY/T 1088—2020《橡胶树割胶技术规程》要求,适宜进行割胶作业的橡胶树树围大于等于 500 mm,以切割深度为 4 mm 计算,树围为 500 ~ 570 mm、调整角度  $\beta < 6^\circ$  时,最大调整误差  $e$  控制在 0.5 mm 以内,割胶机固定轨道在自然情况下可适应最大树围为 700 mm,树围为 570 ~ 700 mm、调整角度  $\beta < 5^\circ$  时,最大调整误差  $e$  控制在 0.5 mm 以内,在割胶作业时可根据不同的树围选择合适的间隔角度。由于计算过程是以理想模型作为参考,在实际割胶作业中由于树形不同,割胶机周向运动轨迹不是标准圆形且割胶刀调整方向与理想状态存在一定偏差,橡胶树形状不同误差不同,实际工作中需根据树形调整柔性固定轨道和割胶机安装位置以减小割胶误差。

2.2 整机控制模块

根据割胶机功能构建了割胶机控制系统,控制流程如图 9 所示。

激光测距割胶机通过蓝牙模块进行控制,当接收到开始命令后,控制板控制激光测距传感器和压力传感器进行数据测量并通过 3 个 A4988 型



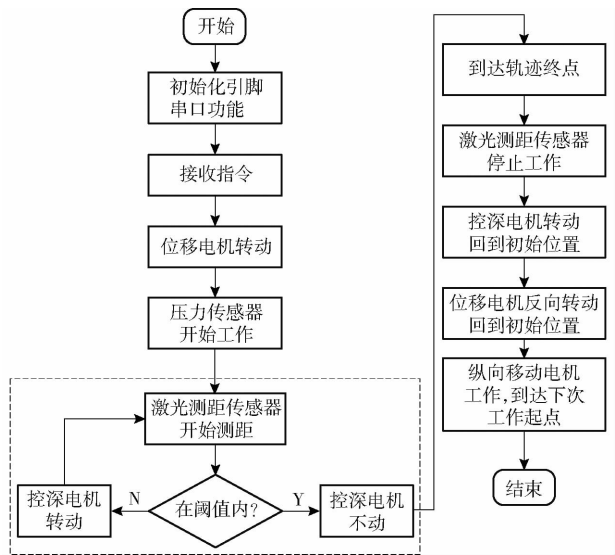


图 9 控制流程图  
Fig. 9 Control flow chart

步进电机驱动模块分别对位移电机、纵向移动电机、控深电机进行控制,实现割胶机行走割胶和割胶刀调整,控制板、传感器和电源驱动模块外接 12 V 直流电源供电。纵向移动电机和位移电机均选用 42 步进电机,其额定电压为 12 V,步距角为 1.8°。为保证步进电机工作过程中的稳定性采用半细分控制方式,即每个脉冲电机转动 0.9°,可通过改变位移电机和纵向移动电机脉冲数改变割胶机割线长度和耗皮量。为便于整机线路整合选用 12 V 直流电源进行供电,通过 LM2596 多路开关电源模块分别为控制板、传感器和电机进行供电以保障割胶机正常运行。

3 割胶试验

为了验证激光测距割胶机的工作性能和割胶效果,进行割胶试验,采用阳刀割胶。通过对割胶机作业过程进行分析并结合橡胶树产胶机理以及割胶机工作要求,为防止出现伤树现象,将切割深度设为 4 mm,耗皮量设为 1.0 ~ 1.6 mm,割胶机位移电机转速设为 24 ~ 72 r/min,割胶试验现场如图 10 所示。



图 10 割胶现场  
Fig. 10 Rubber tapping site

3.1 试验方案

激光测距割胶机割胶效果受位移电机转速、切割深度阈值和耗皮量影响,根据实际割胶作业技术要求,试验因素设置如表 1 所示,切割深度阈值负值表示大于切割深度设定值。

表 1 试验因素水平  
Tab. 1 Test factors and levels

| 水平 | 因素                                |               |        |
|----|-----------------------------------|---------------|--------|
|    | 位移电机转速/<br>(r·min <sup>-1</sup> ) | 切割深度阈值/<br>mm | 耗皮量/mm |
| 1  | 72                                | -0.1 ~ 0.1    | 1.0    |
| 2  | 48                                | -0.2 ~ 0.2    | 1.3    |
| 3  | 24                                | -0.3 ~ 0.3    | 1.6    |

从 3 方面对割胶机工作效果进行评价:①单次割胶刀调整次数(刀具调整次数)。在切割过程中随着激光测距值的变化,割胶刀会进行相应调整,随着调整次数增加会对割面平整度产生影响。②单次割胶压力方差。在割胶过程中理想情况下割胶刀处于平衡状态,压力没有变化,但在实际割胶过程中割胶刀会被树皮表面情况、切割速度等因素影响,单次割胶压力方差可作为衡量割胶稳定性指标。③切割深度合格率。选择树皮表面至内切口的距离为切割深度,切割深度控制决定出胶效果和割胶过程中是否出现伤树,切割深度精度控制是评价割胶机性能的重要指标,在割面上选择 30 个点,测量切割深度,将误差在 0.5 mm 内的点视作合格点,以合格点数占总测量点数百分比作为衡量指标。

3.2 试验结果分析

根据所选因素设计三因素三水平正交试验,每组试验重复 3 次,正交试验方案及结果如表 2 所示,A、B、C 分别表示位移电机转速、切割深度阈值、耗皮量水平值。

表 2 割胶正交试验结果  
Tab. 2 Orthogonal test results of rubber tapping test

| 序号 | 因素 |   |   | 刀具调整<br>次数/次 | 压力方<br>差/N <sup>2</sup> | 切割深度<br>合格率/% |
|----|----|---|---|--------------|-------------------------|---------------|
|    | A  | B | C |              |                         |               |
| 1  | 1  | 1 | 1 | 24.33        | 16.57                   | 92.22         |
| 2  | 1  | 2 | 2 | 22.67        | 17.72                   | 86.67         |
| 3  | 1  | 3 | 3 | 22.00        | 20.83                   | 83.33         |
| 4  | 2  | 1 | 2 | 23.33        | 15.09                   | 94.44         |
| 5  | 2  | 2 | 3 | 21.33        | 17.32                   | 87.78         |
| 6  | 2  | 3 | 1 | 21.00        | 20.15                   | 85.56         |
| 7  | 3  | 1 | 3 | 23.00        | 14.41                   | 96.67         |
| 8  | 3  | 2 | 1 | 20.33        | 17.21                   | 88.89         |
| 9  | 3  | 3 | 2 | 20.00        | 19.22                   | 87.78         |

采用极差分析研究位移电机转速、切割深度阈

值范围和耗皮量对刀具调整次数、压力方差和切割深度合格率的影响,试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,试验因素对刀具调整次数的影响由大到小为切割深度阈值、位移电机转速、耗皮量;试验因素对压力方差的影响由大到小为切割深度阈值、位移电机转速、耗皮量;试验因素对切割深度合格率的影响由大到小为切割深度阈值、位移电机转速、耗皮量。刀具调整次数最优组合为  $A_3B_3C_1$ ;压力方差最优组合为  $A_3B_1C_2$ ;切割深度合格率最优组合为  $A_3B_1C_2$ 。

表 3 试验指标极差分析

Tab.3 Analysis of range of test indicators

| 参数      |   | $k_1$ | $k_2$ | $k_3$ | $R$  |
|---------|---|-------|-------|-------|------|
| 刀具调整次数  | A | 23.00 | 21.89 | 21.11 | 1.89 |
|         | B | 23.55 | 21.44 | 21.00 | 2.55 |
|         | C | 21.89 | 22.00 | 22.11 | 0.22 |
| 压力方差    | A | 18.37 | 17.52 | 16.94 | 1.43 |
|         | B | 15.36 | 17.42 | 20.07 | 4.71 |
|         | C | 17.98 | 17.34 | 17.52 | 0.64 |
| 切割深度合格率 | A | 87.41 | 89.26 | 91.11 | 3.70 |
|         | B | 94.44 | 87.78 | 85.56 | 8.88 |
|         | C | 88.89 | 89.63 | 89.26 | 0.74 |

通过对极差进一步分析可知,切割深度阈值在  $-0.1\sim0.1\text{ mm}$  时压力方差最小,割胶机工作稳定性最佳,切割深度合格率最高,割胶效果最好,但随着切割深度阈值的缩小刀具调整次数逐渐增多,对割面平滑度影响较大。位移电机转速  $24\text{ r/min}$  时在不同切割深度阈值和耗皮量下割胶效果均较好。

通过方差分析对试验因素影响试验指标进行显著性检验,结果如表 4 所示。切割深度阈值对刀具调整次数具有显著影响,对压力方差和切割深度合格率具有极显著影响,位移电机转速对刀具调整次数和压力方差有显著影响,对切割深度合格率无显著影响,耗皮量对 3 种指标均没有显著影响。

综合上述试验结果,对各指标最佳参数组合进一步分析,可以得出割胶机位移电机转速为  $A_3$  时比  $A_1$  时压力方差下降  $1.43\text{ N}^2$ ,切割深度合格率提升 3.7 个百分点,针对不同耗皮量和切割深度阈值范围的情况切割深度合格率均可以达到 87% 以上,满足不同条件下割胶精度的要求,故选择  $A_3$  为位移电机转速最佳因素。当切割深度阈值为  $B_1$  时比  $B_3$  时刀具调整次数增加 2.55 次,但切割深度合格率提升 8.88 个百分点,为了保证割胶工作精度要求选择  $B_1$  作为最佳切割深度阈值。耗皮量对各项指标均没有显著影响,耗皮量为  $C_2$  时切割深度合格率最高,

表 4 试验指标方差分析

Tab.4 Analysis of variance of test indicators

| 差异源     |    | 离差平方和  | 自由度 | 均方    | $F$    | $P$      |
|---------|----|--------|-----|-------|--------|----------|
| 刀具调整次数  | A  | 5.41   | 2   | 2.71  | 23.89  | 0.040 *  |
|         | B  | 11.17  | 2   | 5.58  | 49.27  | 0.019 *  |
|         | C  | 0.075  | 2   | 0.37  | 0.33   | 0.751    |
|         | 误差 | 0.23   | 2   | 0.11  |        |          |
|         | 总和 | 16.89  | 8   |       |        |          |
| 压力方差    | A  | 3.09   | 2   | 1.55  | 19.71  | 0.048 *  |
|         | B  | 33.45  | 2   | 16.73 | 213.23 | 0.004 ** |
|         | C  | 0.64   | 2   | 0.32  | 4.08   | 0.197    |
|         | 误差 | 0.16   | 2   | 0.08  |        |          |
|         | 总和 | 37.34  | 8   |       |        |          |
| 切割深度合格率 | A  | 20.61  | 2   | 10.30 | 24.64  | 0.389    |
|         | B  | 128.32 | 2   | 64.16 | 153.44 | 0.006 ** |
|         | C  | 0.82   | 2   | 0.41  | 0.98   | 0.504    |
|         | 误差 | 0.84   | 2   | 0.42  |        |          |
|         | 总和 | 150.59 | 8   |       |        |          |

注: \* 表示影响显著 ( $0.01\leq P<0.05$ ); \*\* 表示影响极显著 ( $P<0.01$ )。

故选择  $C_2$  作为最佳耗皮量。因此,割胶机最优组合确定为  $A_3B_1C_2$ ,即位移电机转速  $24\text{ r/min}$ 、切割深度阈值  $-0.1\sim0.1\text{ mm}$ 、耗皮量  $1.3\text{ mm}$ 。

为验证最优组合在激光测距割胶机中的工作效果,将最优组合  $A_3B_1C_2$  进行验证性试验。割胶验证试验结果显示,在最优组合下平均刀具调整次数为 22.33 次,压力方差为  $14.89\text{ N}^2$ ,平均切割深度合格率为 95.74%,能够满足割胶工作精度要求。

4 结论

(1)设计了一种激光测距割胶机,通过对激光测距数据进行计算,获得割胶刀与目标点距离,控制割胶刀进给实现对天然橡胶树皮的精准切割。

(2)研究了割胶机割胶刀调整方法,建立了割胶刀与橡胶树皮的位置关系模型,提出了基于激光测量角度间隔的误差计算方法,计算得出当树围为  $500\sim570\text{ mm}$ 、调整角度  $\beta<6^\circ$  和树围为  $570\sim700\text{ mm}$ 、调整角度  $\beta<5^\circ$  时,可将最大调整误差控制在  $0.5\text{ mm}$  以内。

(3)进行割胶机试验,得出最优因素组合为位移电机转速  $24\text{ r/min}$ 、切割深度阈值  $-0.1\sim0.1\text{ mm}$ 、耗皮量  $1.3\text{ mm}$ 。以最优参数组合进行验证试验,结果为平均刀具调整次数 22.33 次,平均压力方差  $14.89\text{ N}^2$ ,切割深度合格率为 95.74%,能够满足割胶工作要求。

参 考 文 献

[1] YANG H, SUN Z, LIU J, et al. The development of rubber tapping machines in intelligent agriculture: a review[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(18):9304.

[2] WONGTANAWIJIT R, KHAORAPAPONG T. Nighttime rubber tapping line detection in near-range images[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(19): 29401 – 29422.

[3] WANG L, HUANG C, LI T, et al. An optimization study on a novel mechanical rubber tree tapping mechanism and technology[J]. *Forests*, 2023, 14(12):2421.

[4] ZHANG H, CHEN Y, CONG J, et al. Reliability study of an intelligent profiling progressive automatic glue cutter based on the improved FMECA method[J]. *Agriculture*, 2023, 13(8):1475.

[5] 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)

[6] FANG J, SHI Y, CAO J, et al. Active navigation system for a rubber-tapping robot based on trunk detection[J]. *Remote Sensing*, 2023,15(15):3717.

[7] 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)

[8] 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)

[9] ZHOU H, GAO J, ZHANG F, et al. Evaluation of cutting stability of a natural-rubber-tapping robot[J]. *Agriculture*, 2023, 13(3):583.

[10] ZHANG H, WEN Z, CHEN Y, et al. Research on cutting angle design optimization of rubber cutter based on discrete element method[J]. *Agriculture*, 2023, 13(10): 1894.

[11] WANG S, ZHOU H, ZHANG C, et al. Design, development and evaluation of latex harvesting robot based on flexible Toggle [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, 147: 103906.

[12] ARJUN R N, SOUMYA S J, VISHNU R S, et al. Semiautomatic rubber tree tapping machine [C] // 1st International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications. IEEE, 2016.

[13] 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)

[14] 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.

[15] 张喜瑞,温振拓,张志富,等. 螺旋运动式自动割胶装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023,54(3):169 – 179.  
ZHANG Xirui, WEN Zhentuo, ZHANG Zhifu, et al. Design and test of automatic rubber-tapping device with spiral movement [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(3): 169 – 179. (in Chinese)

[16] 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)

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

[18] SUN Z J, YANG H, ZHANG Z F, et al. An improved YOLOv5-based tapping trajectory detection method for natural rubber trees[J]. *Agriculture*, 2022, 12(9):1309.

[19] CHEN Y Y, ZHANG H, LIU J X, et al. Tapped area detection and new tapping line location for natural rubber trees based on improved mask region convolutional neural network[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 13:1038000.

[20] NIE F Y, ZHANG W M, 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*, 2022, 27(5): 2623 – 2633.

[21] YANG H, CHEN Y, LIU J, et al. A 3D LiDAR SLAM system based on semantic segmentation for rubber-tapping robot[J]. *Forests*, 2023, 14(9): 1856.

[22] ZHANG C L, YONG L Y, CHEN Y, et al. A rubber-tapping robot forest navigation and information collection system based on 2D LiDAR and a gyroscope[J]. *Sensors*, 2019, 19(9):2136.



[23] 王纪章,王涛,付益辉,等. 数字孪生技术在农业生产管控中的应用现状与展望[J]. 农业机械学报,2024,55(9):1-20.  
WANG Jizhang, WANG Tao, FU Yihui, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in agricultural production process control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(9):1-20. (in Chinese)

[24] 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)

[25] ZHANG S, ZHANG C, ZHANG J, et al. Design and experiment of suspension-typed rubber tapping device[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27: 110-118.

[26] 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)

[27] 温翔宇,洪苑妹,熊建明,等. 固定式天然橡胶自动割胶机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊2):128-135.  
WEN Xiangyu, HONG Yuanmei, XIONG Jianming, et al. Design and experiment of fixed automatic natural rubber tapping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp.2):128-135. (in Chinese)

[28] 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)

[29] 宁彤,梁栋,张燕,等. 固定复合运动轨道式割胶机的设计与试验研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2022,44(4):100-109.  
NING Tong, LIANG Dong, ZHANG Yan, et al. Design and experimental research of fixed compound motion track rubber tapping machine[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(4): 100-109. (in Chinese)

[30] 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)

(上接第 230 页)

[14] 刘明丹,吕晓荣,齐向军,等. 基于 AT89S52 芯片的自动育苗生产线设计[J]. 农业工程学报,2012,28(9):229-232.  
LIU Mingdan, LÜ Xiaorong, QI Xiangjun, et al. Design of automatic seedling production line based on AT89S52[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(9):229-232. (in Chinese)

[15] 李利桥,王德福,李超,等. 转筒与桨叶组合式日粮混合机设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2017,48(10):67-75.  
LI Liqiao, WANG Defu, LI Chao, et al. Design and experimental optimization of rotary drum and paddle combined diet mixer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(10):67-75. (in Chinese)

[16] DING X, WEI Y, YAN Z, et al. Simulation and experiment of the spiral digging end-effector for tray digging in plug tray seedling substrate[J]. Agronomy, 2022, 12(4): 779-790.

[17] 王德福,党春雪,黄会男,等. 桨叶式日粮混合机机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报,2020,51(6):122-131.  
WANG Defu, DANG Chunxue, HUANG Huinan, et al. Mechanism analysis and parameter optimization of paddle type grain mixer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):122-131. (in Chinese)

[18] 黄会男,王德福,李百秋,等. 保育猪饲料喂器设计与排料性能试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):154-162.  
HUANG Huinan, WANG Defu, LI Baiqiu, et al. Feeder design and discharge performance test for nursery pigs[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):154-162. (in Chinese)

[19] LIU M, WANG N, CHEN X, et al. Design of feed screw conveyor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1601(6): 062005.

[20] 郭小宏,李荣强. 混合料粒料速度特性与摊铺机布料器结构和转速规律研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2008(4):38-41.  
GUO Xiaohong, LI Rongqiang. Study on the velocity characteristics of mixture particles and the structure and speed law of paver distributor[J]. Road Construction Machinery and Construction Mechanization, 2008(4):38-41. (in Chinese)