

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.03.008

曾山, 武玉金, 曾丰毅, 等. 固定式橡胶自动割胶机的设计与试验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(3): 92-102.

固定式橡胶自动割胶机的设计与试验

曾山, 武玉金, 曾丰毅, 于开鑫, 马立刚, 杨文武

华南农业大学 工程学院/南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642

摘要: 针对目前传统人工割胶劳动强度大、胶工短缺、尚无成熟自动割胶工具的问题, 结合割胶的技术要求和行业标准, 设计了一种固定式橡胶自动割胶机。采用 SolidWorks 三维软件对整机结构进行建模与装配, 并对其工作原理进行了阐述。设计了橡胶自动割胶机的关键机构, 重点对割胶刀进行了分析。进行了林间试验, 以切割深度、耗皮厚度和割线螺旋角为因素, 以割胶后 5 min 排胶量为评价指标, 设置 3 因素 3 水平正交试验。试验结果表明, 固定式橡胶自动割胶机的最优工作参数为切割深度 8 mm、耗皮厚度 1.5 mm、割线螺旋角 27.5°, 在最优工作参数下割胶后 5 min 胶乳的产量为 9.3 mL。

关键词: 天然橡胶; 割胶机; 固定式; 结构设计; 试验

中图分类号: S225; TH122

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)03-0092-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Test of Automatic Rubber Tapping Machine

ZENG Shan, WU Yujin, ZENG Fengyi,

YU Kaixin, MA Ligang, YANG Wenwu

College of Engineering, South China Agricultural University / Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China

Abstract: In response to the current problem of high labor intensity and shortage of workers in traditional manual rubber tapping, and the lack of mature automatic rubber tapping tools, a fixed automatic rubber tapping machine is designed based on the technical requirements and industry standards of rubber tapping. SolidWorks 3D software was used to model and assemble the overall construction of the rubber automatic tapping machine, and the working principle of the machine was explained. The key mechanisms were designed, with a focus on analyzing the cutting knife. A forest experiment was conducted with cutting depth, bark consumption thickness, and secant helix angle as factors, and the amount of latex discharged

收稿日期: 2023-04-22

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B020217003)。

作者简介: 曾山, 博士, 研究员, 主要从事智能农机技术与装备研究。

通信作者: 杨文武, 博士, 副教授。

5 minutes after cutting as evaluation indicators. A three-factor and three-level orthogonal experiment was set up. The experimental results show that the optimal working parameters of the fixed automatic rubber tapping machine are 8 mm of cutting depth, 1.5 mm of bark thickness, and 27.5° of cutting helix angle. Under the optimal working parameters, the latex production after 5 minutes of cutting is 9.3 mL.

Key words: natural rubber; rubber tapping machine; fixed type; structural design; experiment

天然橡胶作为重要的工业原料和战略物资,具有较强的耐磨性、绝缘性、密封性和减震性等优点,被广泛应用于日常生活、军事国防和交通运输等领域^[1].天然橡胶来源于橡胶树,是由割胶后收获的胶乳加工处理后制成的产品.割胶是通过割胶工具割去橡胶树的树皮,收集从树干上沿割面流下来的胶乳,该过程是天然橡胶收获的关键环节^[2].根据橡胶树割胶技术规程,割胶作业有严格的技术要求^[3],割胶太深会对橡胶树造成伤害,割胶太浅不能割断大多数乳管从而影响产量.橡胶树在我国的种植面积已超过 110 万 hm²,目前我国橡胶的收获依然采用传统人工割胶的方式^[4].由于人工割胶劳动强度大、技术要求高、生产成本低,已出现胶工短缺和胶园弃管弃割的现象^[5-6],制约了我国橡胶产业的发展^[7].

为提高割胶效率,解决无人割胶等问题,国内外已对自动割胶工具进行了多年的研究.目前割胶机械的自动化程度依然很低.按照割胶工具的操作方式不同,可分为手工割胶刀、半自动割胶机、自动割胶机和割胶机器人等^[8].使用最多的是手工割胶刀,其效率低,且割胶工人上岗前要经过长时间培训.电动割胶机虽然降低了胶工的劳动强度,但仍需一定的操作技术,目前尚处于推广应用阶段.自动割胶是未来的发展趋势,但由于胶林地形复杂,割胶机器人在胶林自主导航行走的问题,还需要进一步研究^[9-11].因此自动割胶机一般采用固定式,可避免割胶机器人无法行走的问题^[12].

印度和日本研制了自动割胶刀^[13],但仍需要胶工凌晨去胶林割胶,没有完全解放劳动力^[14-15].中国热带农业科学院橡胶研究所研制了 4GXJ-I 型和 4GXJ-2 型电动割胶刀^[16-17],降低了胶工的操作难度,但存在不能去除胶线和排屑的问题,还需进一步优化.王学雷设计了一种混联机构的割胶机器人^[18],但只进行了机械臂的研究,无底盘搭载无法进行林间作业.马来西亚发明了一种捆绑式自动智能割胶机^[19],但螺旋运动误差大、切割深度不可调,容易伤树或不出胶.海南大学发明了一种自动割胶机^[20],切割深度可调,但割线的斜度不可调,不能满足不同的割胶轨迹要求.

针对上述问题,结合割胶的技术要求和行业标准,重点对固定式橡胶自动割胶机的定位机构、割胶机构和运动机构进行了设计与试验研究,以期为橡胶收获的机械化和自动化装备研发提供参考.

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

固定式橡胶自动割胶机主要由定位机构、运动机构、割胶机构、限位模块、控制系统和电源等组成,如图 1 所示.定位机构将自动割胶机固定在橡胶树上,并保证割胶机构与树干同轴心;运动机构由 2 个步进电机驱动,通过圆周运动和直线运动的合成,带动割胶机构螺旋运动;在割胶机构上安装割胶刀,通过电动推杆实现割胶的进刀和退刀动作;通过限位模块上的光电传感器识别圆周运动和直线运动的起点,通过控制系统控制自动割胶机,根据割胶作业流程,实现割胶刀自右下向左上螺旋运动进行割胶.

1.2 工作原理

固定式橡胶自动割胶机的工作原理如下:启动电源,控制系统收到割胶指令后,割胶机构先进行复位动作,当限位模块触发时回到原点准备割胶;运动机构直线运动上升到起刀位置,电动推杆伸出实现进刀动作;2 个步进电机同时转动,带动割胶刀螺旋运动切割树皮;步进电机的脉冲走完完后完成割胶,电动推杆收回实现退刀动作,割胶刀所走螺旋轨迹的长度和角度,通过修改步进电机的脉冲数实现;2 个步进电机

再同时反转进行复位动作，割胶机构复位后，完成割胶作业等待下次割胶指令；当自动割胶机收到下次割胶指令时，起刀位置会自动低于上次一定的脉冲数(耗皮量)，再进行割胶作业。

2 关键机构设计

2.1 定位机构

固定式橡胶自动割胶机进行割胶作业时，先将其安装固定在橡胶树上。为将自动割胶机稳定地固定在橡胶树上，设计了如图 2 所示的一种固定带式定位机构，可满足树围不同的橡胶树割胶，保证自动割胶机与橡胶树同轴心，降低割胶误差。固定带式定位机构由固定圈和固定扣组成，与环形导轨连接，通过在固定圈上等间距开出 8 个卡槽，来适应树围在 500 mm~800 mm 之间的橡胶树。通过螺栓上紧定位机构，固定带可增大与树皮的接触面积，保证自动割胶机固定的稳定性。

自动割胶机采用上、下 2 个固定机构与环形导轨连接固定在橡胶树上。固定带受力分析如图 3 所示，2 条固定带与树皮间摩擦力的合力大小要大于自动割胶机自身的重量，否则自动割胶机会沿着树干向下移动，影响割胶的精确性和二次割胶。根据牛顿定律，自动割胶机固定在橡胶树上时应满足以下公式：

$$\begin{cases} F_{f1} = \mu F_{N1} \\ 2F_{f1} = G_1 \end{cases} \tag{1}$$

式中： F_{f1} 为固定带与树皮间的摩擦力； F_{N1} 为固定带与树皮间的压力； G_1 为自动割胶机的重量； μ 为固定机构与树皮间的摩擦系数。

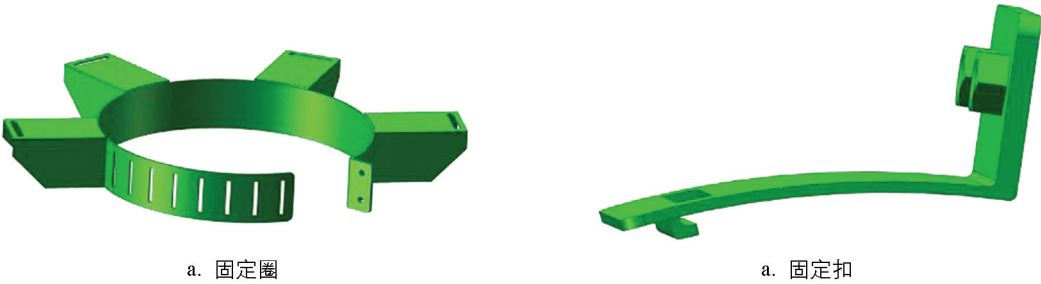


图 2 固定带式定位机构

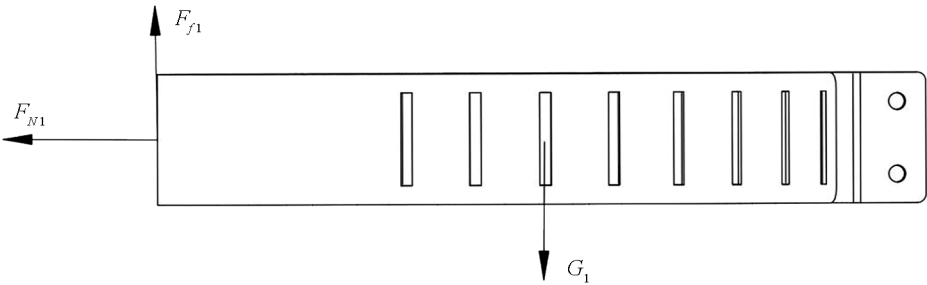
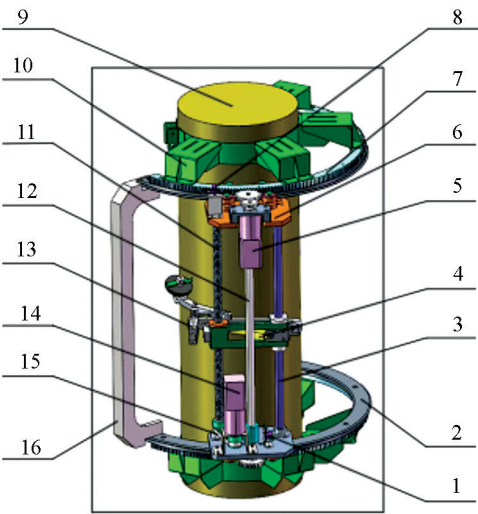


图 3 固定带受力分析图



1. 光电传感器 1；2. 环形轨道；3. 直线导轨；4. 电动推杆；5. 上步进电机；6. 运动机构；7. 环形齿；8. 光电传感器 2；9. 橡胶树模型；10. 定位机构；11. 梯形丝杠；12. 同步轴；13. 割胶机构；14. 下步进电机；15. 同步齿形带；16. 支撑杆。

图 1 固定式橡胶自动割胶机

2.2 运动机构

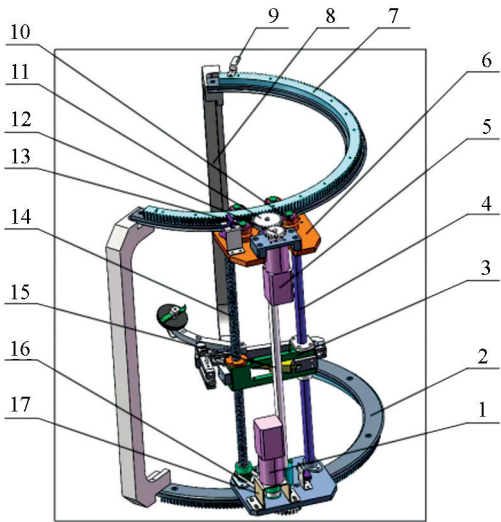
固定式橡胶自动割胶机运动机构主要由环形齿、环形导轨、直线导轨、梯形丝杠、同步轴和步进电机等组成, 如图 4 所示. 运动机构是带动割胶刀沿橡胶树螺旋运动的关键机构, 其工作原理为: 采用齿轮传动和带传动带动割胶机构螺旋运动, 一个步进电机通过齿轮传动实现圆周运动, 另一个步进电机通过带传动带动梯形丝杠转动实现直线运动.

2.2.1 圆周运动机构设计

根据割胶技术要求, 阳线割线螺旋角为 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 阴线割线螺旋角为 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$. 将橡胶树简化为圆柱体, 则割胶时割胶刀在水平方向移动的距离 x 为树围的一段弧长, 在竖直方向移动的距离 y 为一段直线, 如图 5 所示, y 与 x 的比值为螺旋角的正切值 $\tan \beta$. 为满足割胶技术要求, 对自动割胶机的运动机构进行设计.

$$\begin{cases} x = v_1 t \\ y = v_2 t \\ \tan \beta = y/x \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_1 为割胶刀水平方向的速度; v_2 为割胶刀竖直方向的速度; t 为割胶刀切割的时间; β 为割线螺旋角; x 为割胶刀在水平方向移动的距离; y 为割胶刀在竖直方向移动的距离.

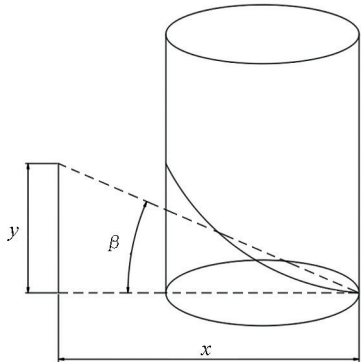


1. 下步进电机; 2. 环形轨道; 3. 割胶机构; 4. 直线导轨; 5. 上步进电机; 6. 安装板; 7. 环形齿; 8. 支撑杆; 9. 限位片; 10. 向心轴承; 11. 圆柱齿轮 1; 12. 圆柱齿轮 2; 13. 光电传感器; 14. 梯形丝杠; 15. 同步轴; 16. 同步齿形带; 17. 电机安装座.

图 4 运动机构



a. 螺旋轨迹



b. 理论轨迹

图 5 割线轨迹

自动割胶机通过同步轴使上下机构同步运动. 按照传统人工割胶的技术要求, 自动割胶机要满足割线的螺旋轨迹占树围的二分之一. 考虑到整机结构的布局和割胶机构的限制, 采用 220° 的环形轨道和环形齿. 根据橡胶树的开割标准, 当树围达到 500 mm 时便可开始割胶, 此时橡胶树的直径约为 160 mm. 考虑切割不同树围的橡胶树和结构布局, 为保证割胶刀与树皮间的距离, 环形轨道内侧直径选择为 450 mm, 外侧直径选择为 510 mm, 环形齿分度圆直径选择为 500 mm. 选定圆柱齿轮的模数 m 为 2 mm, 圆柱齿轮 1 的齿数 z_1 为 25, 圆柱齿轮 2 的齿数 z_2 为 17. 查阅《机械设计手册》, 圆柱齿轮的分度圆直径计算公式为:

$$d = m z \quad (3)$$

式中: d 为圆柱齿轮的分度圆直径; m 为圆柱齿轮的模数; z 为圆柱齿轮的齿数.

计算出 2 个圆柱齿轮的分度圆直径分别为:

$$d_1 = mz_1 = 50 \text{ mm} \quad (4)$$

$$d_2 = mz_2 = 34 \text{ mm} \quad (5)$$

式中: d_1 为圆柱齿轮 1 的分度圆直径; d_2 为圆柱齿轮 2 的分度圆直径; m 为圆柱齿轮的模数; z_1 为圆柱齿轮 1 的齿数; z_2 为圆柱齿轮 2 的齿数.

环形齿整环的齿数为:

$$z_a = \frac{d_h}{m} = 250 \quad (6)$$

式中: z_a 为环形齿整环的齿数; d_h 为环形齿的分度圆直径; m 为环形齿的模数.

根据环形齿占整环的比例, 可计算出其齿数为:

$$z_h = (220^\circ/360^\circ)z_a \approx 153 \quad (7)$$

式中: z_h 为环形齿的齿数; z_a 为环形齿整环的齿数.

二分之一树围对应环形齿的齿数 z_3 为:

$$z_3 = (180^\circ/360^\circ)z_a = 125 \quad (8)$$

式中: z_3 为二分之一树围环形齿的齿数; z_a 为环形齿整环的齿数.

2.2.2 直线运动机构设计

通过步进电机用带传动带动梯形丝杠转动, 实现割胶机构沿树干直线运动. 割胶刀的直线运动是决定割线螺旋轨迹的重要因素, 速度过快或过慢都无法割出满足割胶技术要求的割线, 不利于胶乳的排出和收集, 为梯形丝杠选择合适的导程与直径是满足螺旋轨迹的关键.

橡胶树的树围为 500 mm 时, 二分之一树围为 250 mm, 割胶刀在水平方向圆周运动的弧长 l 为 250 mm, 为割出割线轨迹为 $25^\circ \sim 30^\circ$ 的螺旋线, 则割胶刀在竖直方向运动的距离为:

$$h_1 = l \tan 25^\circ \approx 116 \text{ mm} \quad (9)$$

$$h_2 = l \tan 30^\circ \approx 144 \text{ mm} \quad (10)$$

式中: h_1 、 h_2 分别为割胶刀在竖直方向运动的距离下限与上限; l 为割胶刀在水平方向圆周运动的弧长.

梯形丝杠带动割胶刀沿树干方向运动的距离在 116 mm~144 mm 之间. 选择同步齿形带的传动比为 1, 步进电机的减速比为 1:20, 设置步进电机的转速为 300 r/min, 则梯形丝杠的转速为 15 r/min. 设定割胶时间为 2 min, 则梯形丝杠转过的圈数 n 为 30 圈. 设定割线螺旋角为 25° , 可得梯形丝杠的导程 P 为:

$$P = \frac{h}{n} \quad (11)$$

式中: P 为梯形丝杠的导程; h 为割胶刀在竖直方向运动的距离; n 为梯形丝杠转过的圈数.

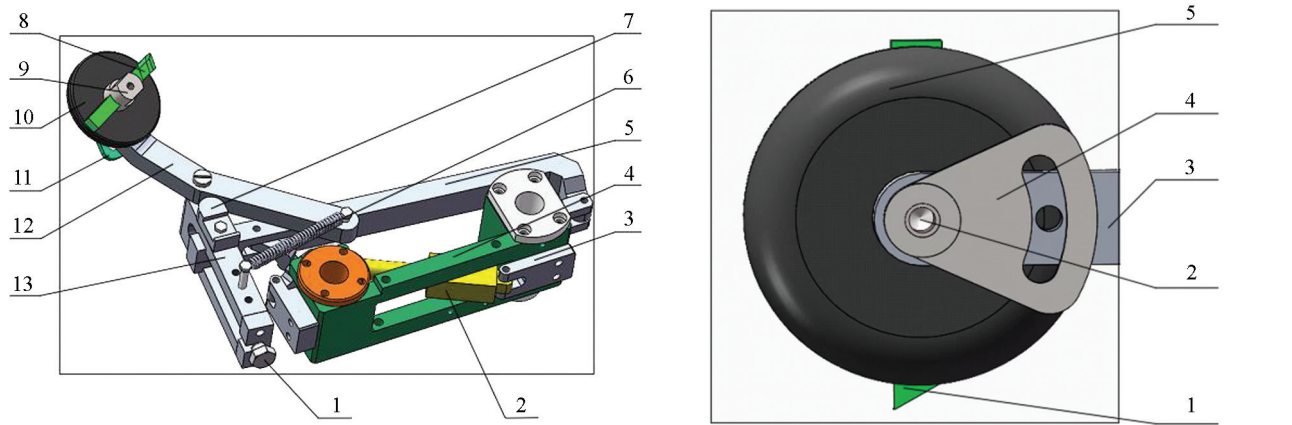
由式(9)和式(11)得 $P = 3.86 \text{ mm}$. 查阅《机械设计手册》, 选取梯形丝杠的导程 $P = 4 \text{ mm}$, 梯形丝杠的直径 $D = 16 \text{ mm}$, 摩擦系数 $\mu = 0.1$, 螺旋角 $\delta = 30^\circ$, 设计梯形丝杠的长度 $L = 514 \text{ mm}$, 符合运动设计的要求.

2.3 割胶机构

割胶对切割深度有严格的要求, 切割太深会伤树, 切割太浅不出胶. 根据割胶技术规程, 割胶深度要求内切口与形成层之间的距离为 1.2 mm~1.8 mm. 割胶机构采用电动推杆与拉簧的配合, 由控制系统控制电动推杆的伸出和缩回, 实现割胶机构的进刀和退刀动作, 如图 6 所示. 为保证切割深度一致和适应不同树围的橡胶树, 对割胶机构进行设计.

调节螺栓与连杆和摆杆相配合, 拧动调节螺栓使连杆相对摆杆前后移动, 以调节割胶刀与树皮间的距离. 通过调整挡阻的角度, 可为摆臂提供不同的支点, 改变摆臂的角度以适应不同的橡胶树. 摆臂的头部倾斜角度与割线螺旋角相同, 使与其上表面接触的仿形轮也向上倾斜相同的角度, 保证仿形轮可沿割线轨

迹纯滚动. 割胶刀安装在仿形轮的上方, 通过调节割胶刀伸出仿形轮的距离来控制切割深度, 并保证切割深度的一致性, 避免对橡胶树造成伤害. 通过调节板与割胶刀安装座的配合, 转动调节板调节割胶刀进刀时的入刀角度, 保证进刀时割胶刀正对橡胶树轴心, 如图 7 所示.



1. 调节螺杆; 2. 电动推杆; 3. 安装板; 4. 滑块; 5. 摆杆; 6. 拉簧; 7. 挡阻; 8. 割胶刀; 9. 割胶刀安装座; 10. 仿形轮; 11. 调节板; 12. 摆臂; 13. 连杆.

1. 割胶刀; 2. 割胶刀安装座; 3. 摆臂; 4. 调节板; 5. 仿形轮.

图 6 割胶机构

图 7 入刀角度调节

2.4 控制系统

固定式橡胶自动割胶机采用 PLC 控制器, 自动控制割胶机各机构按顺序动作完成割胶作业. 控制系统采用三菱 FX3U 系列 PLC, 用步进指令(STL)编写自动割胶机的控制程序. 通过 2 个 DS-OLS4-FPD 数字式两相步进驱动器驱动 2 个步进电机转动, 实现割胶机构割胶时的螺旋运动和下一次割胶的换行动作. 通过直流电机驱动模块控制电动推杆伸缩, 实现割胶刀进刀和退刀动作. 通过 2 个光电传感器监测割胶机构复位时是否回到右原位和下原位. 通过触摸屏修改 PLC 寄存器中的数值, 实现对割线螺旋角和割线长度的调整, 从而调节割线轨迹. 自动割胶机控制程序框图如图 8 所示, 按照程序框图编写控制程序梯形图.

3 割胶刀设计与分析

3.1 割胶刀受力分析

3.1.1 进刀受力分析

为保证自动割胶机在进刀时割胶刀能切入树皮, 在割胶时割胶刀能切割树皮, 需提供割胶刀足够的推力. 通过割胶刀的受力分析, 对其结构进行设计. 采用 L 形割胶刀进行受力分析, 割胶时割胶刀先切入树皮, 再沿割线轨迹割去树皮. 进刀时割胶刀切入树皮的受力分析如图 9 所示, 刀头切入树皮时有一定的入刀角度, 树皮对割胶刀产生阻力, 割胶刀需克服进刀时的阻力才能切入树皮.

根据牛顿定律, 割胶刀切入时其受力要满足:

$$\begin{cases} F \cos(\theta + \lambda) - F_f - G \sin(\theta + \lambda) \geq 0 \\ F \sin(\theta + \lambda) + G \cos(\theta + \lambda) - F_n = 0 \\ F_f = \mu F_n \\ \mu = \tan \varphi \end{cases} \quad (12)$$

式中: F 为割胶刀的进刀力; F_n 为树皮对割胶刀的反作用力; F_f 为割胶刀受到的摩擦力; G 为割胶刀自身的重量; μ 为割胶刀与树皮间的摩擦系数; φ 为割胶刀与树皮间的摩擦角; λ 为割胶刀的进刀角度; θ 为割胶刀倾斜的角度.

对式(12)简化得：

$$F_n \leqslant \frac{F[\sin(\theta + \lambda) + \cos(\theta + \lambda)] + G[\cos(\theta + \lambda) - \sin(\theta + \lambda)]}{1 + \tan \varphi}$$

(13)

因为摩擦系数取决于接触面的材料性质和表面情况，所以 $\tan \varphi$ 为定值，由式(13)可知树皮对割胶刀反作用力的主要影响因素有割胶刀进刀角度 λ 和割胶刀倾斜角度 θ 。

3.1.2 割胶受力分析

自动割胶机完成进刀动作后，割胶刀切进树皮，开始按照规划的螺旋轨迹运动，割胶刀的刀刃割去树皮后形成一条新的割线。按照手工割胶的技术要求，割胶的耗皮量为 1.2 mm~2.0 mm，割胶刀刃角的大小是影响割胶效果的一个重要因素，对割胶刀刀刃进行受力分析，如图 10 所示。

割胶刀在割去树皮时，刀刃会受到树皮的反作用力和摩擦力，根据牛顿定律对刀刃进行受力分析可得：

$$\begin{cases} F_3 \cos \alpha - f_1 > 0 \\ F_3 \sin \alpha = F_N \\ f_1 = \mu F_N \end{cases}$$

(14)

式中： F_3 为割胶刀对树皮的切割力； F_N 为树皮对割胶刀的支持力； f_1 为树皮对割胶刀的摩擦力； μ 为割胶刀与树皮间的摩擦系数； α 为割胶刀刃口的角度。

简化式(14)得：

$$\tan \alpha < \frac{1}{\mu}$$

(15)

分析式(15)可知，因为割胶刀与树皮间的摩擦系数 μ 为定值，所以割胶刀刃口角度的正切值 $\tan \alpha$ 需小于一个定值。 α 越小，割胶刀刃口的滑切性能越好，但 α 太小，会造成刃口的斜面太长，割胶刀容易变形且耐用性差，同时刃口角度太小不利于去除树皮。通过对刃口的受力分析可知，割胶刀刃口的角度在 $20^\circ \sim 35^\circ$ 的范围内较为合适。

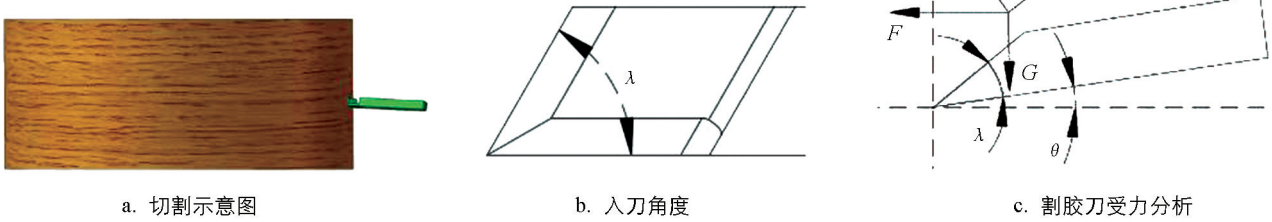


图 9 进刀时割胶刀受力分析

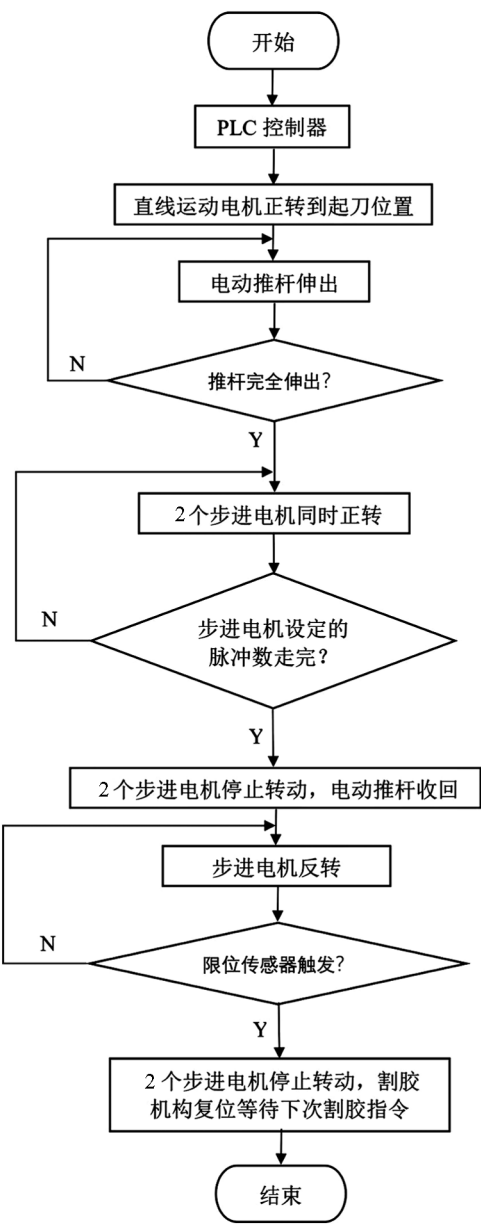


图 8 控制系统程序框图

3.2 割胶刀设计

割胶刀长期在胶乳的腐蚀和潮湿的环境下工作, 考虑到割胶刀的耐用性和经济性, 割胶刀的材料选择硬度为 HRC64 的 W18Cr4V 钨系高速钢, 经热处理后, 开出满足割胶技术要求的刀刃. 参考传统 L 形推式手工割胶刀对自动割胶机的割胶刀进行设计, 选择其入刀角度为 30° , 如图 11 所示. 割胶刀的平刃切割水平方向的树皮, 割出排胶的出胶面; 立刃沿树干方向切割内层的树皮, 使割胶后切屑与树干分离. 平刃和立刃厚 2 mm, 两刃之间的夹角为 90° , 刀刃刃口角度为 30° . 设计刀头平刃底面向上倾斜 2° , 使割胶后形成的排胶面略向上倾斜, 防止排出的胶乳在割线上外溢.

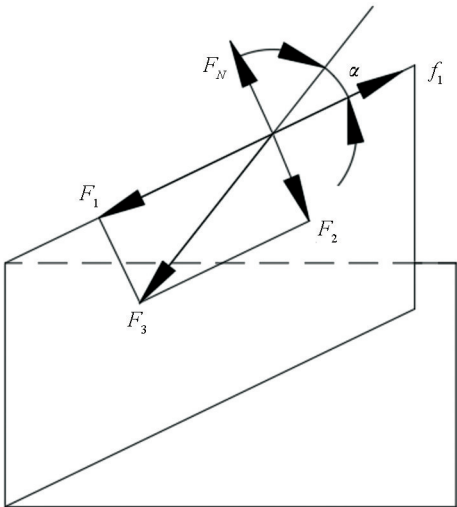
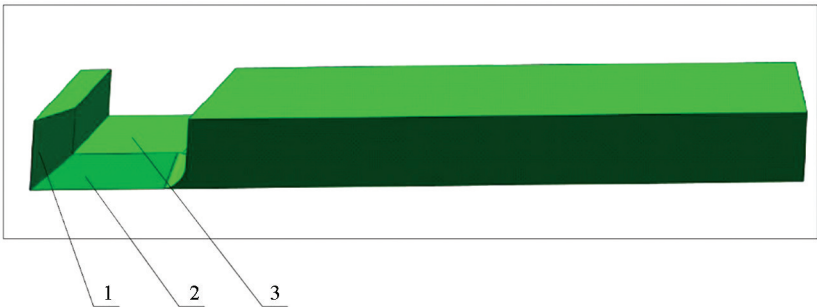


图 10 刀刃受力分析



1. 立刃; 2. 平刃; 3. 刀头.

图 11 割胶刀

4 林间试验

为验证固定式橡胶自动割胶机割胶性能的稳定性和可靠性, 于 2022 年 8 月在广东省茂名市高州市胜利农场进行割胶试验, 试验橡胶树品种为热研 7-33-97.

4.1 试验方案

试验按照《橡胶树割胶技术规程》(NY/T 1088—2006) 的割胶标准, 在胶林中选取 20 棵树围不同的橡胶树进行林间试验, 对自动割胶机割胶性能进行测试. 割胶性能以割胶结束后胶乳的产量和割面的平整性来评价. 以切割深度、耗皮厚度和割线螺旋角为因素设置梯度进行 3 因素 3 水平试验, 以割胶结束后 5 min 排胶量为评价指标, 并对割面情况进行测量, 每组试验重复 3 次取平均值, 以对自动割胶机工作参数进行修正, 明确影响排胶量的主次因素, 确定最优的工作参数. 林间试验如图 12 所示.

预试验发现, 切割深度小于 4 mm 时, 割面无胶乳排出, 切割深度大于 8 mm 时, 出现伤树的情况, 因此切割深度在 4 mm~8 mm 之间设置梯度. 试验因素编码如表 1 所示.



图 12 林间试验

表 1 试验因素编码

水平	切割深度/mm	耗皮厚度/mm	螺旋角/°
−1	4	1	25
0	6	1.5	27.5
1	8	2	30

4.2 试验结果与分析

选用 Box-Behnken 响应面试验设计方法，试验方案和结果见表 2.

表 2 试验方案与结果

试验序号	切割深度/mm	耗皮厚度/mm	螺旋角/°	5 min 排胶量 Y/mL
1	6	1.5	27.5	6.2
2	4	1	27.5	1.2
3	6	2	25	6.6
4	4	2	27.5	2.6
5	6	1	30	5.8
6	6	2	30	7.1
7	4	1.5	25	1.9
8	8	1.5	25	8.8
9	6	1.5	27.5	6.5
10	6	1	25	5.6
11	6	1.5	27.5	6.3
12	6	1.5	27.5	6.7
13	8	1	27.5	7.2
14	8	1.5	30	8.1
15	8	2	27.5	9.6
16	4	1.5	30	2.1
17	6	1.5	27.5	6.4

4.2.1 回归分析与显著性检验

采用 Design-Expert 软件 Box-Behnken 模块对试验数据进行多元回归拟合，得到割胶结束后 5 min 排胶量回归方程，采用 F 检验验证其显著性. 各因素影响割胶结束后 5 min 排胶量的回归方程为：

$$Y=6.42+3.24A+0.76B+0.025C+0.25AB+0.075BC-1.16A^2-0.11B^2-0.035C^2$$

(16)

回归方程的显著性检验与方差分析见表 3. 由表 3 可知，回归方程的 p 值小于 0.000 1，说明模型拟合度极显著. 回归方程失拟项的 p 值大于 0.05，说明模型失拟性不显著，回归方程决定系数 $R^2=0.993\ 6$ ，说明回归方程拟合度较高. 由切割深度、耗皮厚度和割线螺旋角的 p 值可以判断，切割深度和耗皮厚度对割胶结束后 5 min 的排胶量影响极显著，割线螺旋角对割胶结束后 5 min 的排胶量影响不显著. 通过回归系数的检验可知，试验因素对割胶结束后 5 min 排胶量的影响顺序依次为切割深度、耗皮厚度、割线螺旋角.

表 3 回归方程方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值
模型	94.82	9	10.54	120.80	<0.000 1
A	83.85	1	83.85	961.44	<0.000 1
B	4.65	1	4.65	53.33	0.000 2
C	5.0×10^{-3}	1	5.0×10^{-3}	0.057	0.817 6
AB	0.25	1	0.25	2.87	0.134 3
AC	0.20	1	0.20	2.32	0.171 4
BC	0.022	1	0.022	0.26	0.627 1
A ²	5.67	1	5.67	64.96	5.0×10^{-3}
B ²	0.051	1	0.051	0.58	0.469 7
C ²	5.158×10^{-3}	1	5.158×10^{-3}	0.059	0.814 8
残差	0.61	7	0.087		
失拟项	0.46	3	0.15	4.17	0.100 8
纯误差	0.15	4	0.037		
总和	95.43	16			

注: $p<0.01$ (极显著), $0.01\leq p<0.05$ (显著).

4.2.2 响应曲面分析

根据回归模型分析结果,应用 Design-Expert 软件绘制切割深度与其他 2 个因素交互影响的三维响应曲面如图 13 所示. 随着切割深度逐渐增大,胶乳产量越高,其原因是切割越深割断的乳管越多,所以最优切割深度取最大值. 随着耗皮厚度逐渐增大,胶乳产量缓慢增大,且增长速度逐渐减小,其原因是耗皮厚度越大越能去除上次割胶流下的胶塞,为保证橡胶树的割胶年限,耗皮厚度取中间值. 随着螺旋角逐渐增大,胶乳产量缓慢增大到稳定值,其原因是螺旋角越大胶乳向下流动的能力越强、外溢越少,但螺旋角太大割断的乳管变少,所以螺旋角取中间值. 综上,结合回归模型及响应面的变化情况,选取切割深度 8 mm,耗皮厚度 1.5 mm、割线螺旋角 27.5°为固定式橡胶自动割胶机的最优工作参数,在最优工作参数下割胶后 5 min 胶乳的产量为 9.3 mL.

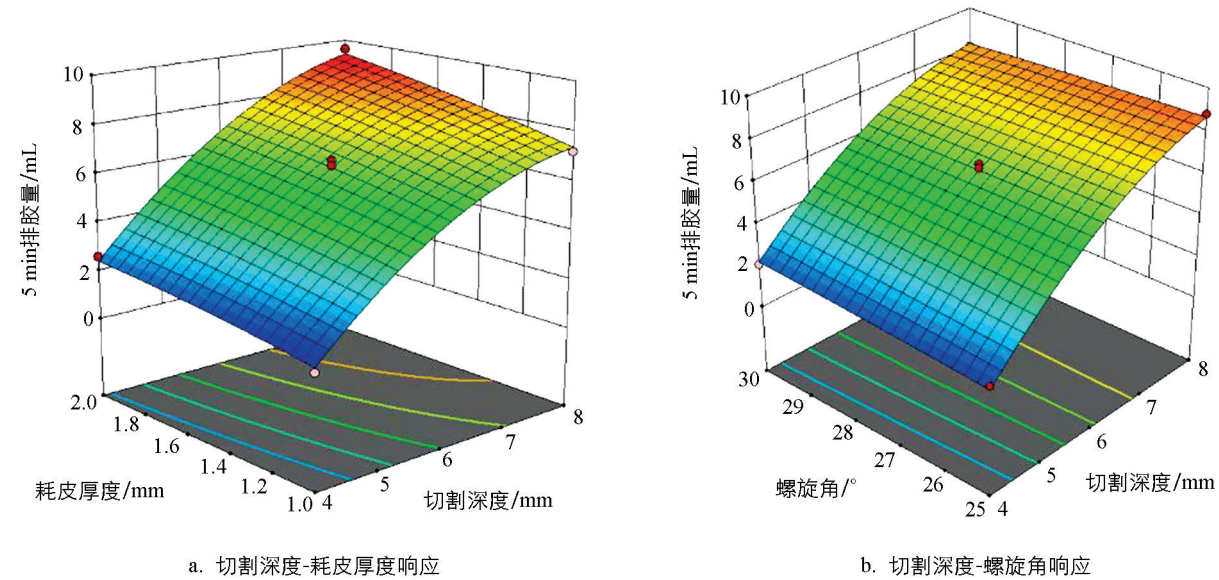


图 13 响应曲面

5 结论

1) 根据割胶的技术要求,研制了一种固定式橡胶自动割胶机,阐述分析了整机结构和工作原理. 运动

机构采用 2 个步进电机驱动, 割胶机构采用电动推杆驱动, 满足割胶技术要求, 降低割胶的劳动强度.

2) 对固定式橡胶自动割胶机的关键机构进行设计, 保证割胶机构与树干同轴心和切割深度一致, 适用于树围不同的橡胶树割胶.

3) 完成了固定式橡胶自动割胶机样机试制并进行了林间试验. 试验结果表明, 固定式橡胶自动割胶机最优工作参数为切割深度 8 mm、耗皮厚度 1.5 mm、割线螺旋角 27.5° , 在最优工作参数下割胶后 5 min 胶乳的产量为 9.3 mL. 试验因素对割胶结束后 5 min 排胶量的影响顺序依次为切割深度、耗皮厚度、割线螺旋角.

4) 固定式橡胶自动割胶机的整机质量为 22.5 kg, 整机质量较大搬运不便, 在后续研究中, 可对整机结构进行拓扑优化设计, 降低整机质量.

参考文献:

- [1] 仇键, 杨文凤, 魏芳, 等. 国内天然橡胶采收生产形势分析与建议 [J]. 中国热带农业, 2021(5): 7-12.
- [2] 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.
- [3] 中华人民共和国农业部. 橡胶树割胶技术规程: NY/T 1088—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [4] 王玲玲, 黎土煜, 陈娃容, 等. 我国热带丘陵山区胶园采收机械和技术研究现状 [J]. 安徽农业科学, 2022, 50(12): 183-187, 192.
- [5] 张良, 胡伟, 许能锐. 胶农割胶制度选择行为及其影响因素——基于海南与云南民营胶园调查 [J]. 中国热带农业, 2017(2): 35-40.
- [6] 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.
- [7] 张慧, 张燕. 基于 PLC 控制的小型割胶机的设计 [J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 168-170, 195.
- [8] 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.
- [9] 安锋, 林位夫, 谢贵水, 等. 一种基于无人驾驶系统的自动割胶收胶系统: 201610123861.8 [P]. 2016-07-20.
- [10] 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.
- [11] ZHOU H, ZHANG S L, ZHANG J X, et al. Design, Development and Field Evaluation of a Rubber Tapping Robot [J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(1): 28-54.
- [12] 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.
- [13] SOUMYA S J, VISHNU R S, ARJUN R N, et al. Design and Testing of a Semi Automatic Rubber Tree Tapping Machine (SART) [C] //2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC). Agra, India. IEEE, 2016: 1-4.
- [14] SUNHEEM P, AIYARAK P. A Microwave Transmission Instrument for Rapid Dry Rubber Content Determination in Natural Rubber Latex [J]. MAPAN, 2016, 31(2): 129-136.
- [15] ZHANG L, ZHAO Z M, JI Y Y, et al. Determination of Dry Rubber Content in Natural Rubber Latex Based on Wavelet-Domain Fluorescence Image [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2013, 41(4): 20120227.
- [16] 郑勇, 张以山, 曹建华, 等. 4GXJ-I 型电动胶刀采胶对割胶和产胶特性影响的研究 [J]. 热带作物学报, 2017, 38(9): 1725-1735.
- [17] 陈娃容, 肖苏伟, 贾倩, 等. 4GXJ-2 型电动割胶刀的传动结构设计与运动仿真分析 [J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2021, 34(4): 24-31.
- [18] 王学雷. 一种基于混联机构的割胶机器人运动控制技术研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [19] N·艾哈迈德, K·阿布·马利克, M·H·马罗夫, 等. 自动割胶机: 201280011835.6 [P]. 2013-11-27.
- [20] 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.