

固定式天然橡胶自动割胶机设计与试验

温翔宇^{1,2} 洪苑妹³ 熊建明⁴ 余以刚⁴ 谭俭辉³ 孟祥宝^{1,2}

(1. 广东省现代农业装备研究所, 广州 510630; 2. 农业农村部华南现代农业智能装备重点实验室, 广州 510630;
3. 深圳市现代农业装备研究院, 深圳 518022; 4. 东莞市翊顺智能科技有限公司, 东莞 523920)

摘要: 为解决天然橡胶夜间割胶作业劳动强度大、割胶工短缺、割胶效率低等问题,设计一种固定式天然橡胶自动割胶机,采用行走电机与丝杆电机分别驱动割胶刀绕树转动以及沿竖直方向运动,2种运动复合形成割胶刀螺旋线作业轨迹,实现割胶机根据橡胶树生长状况调节螺旋线升角,保证排胶顺畅。采用丝杆电机与旋转编码盘配合,实现割胶机耗皮量的调整,通过仿形双弹簧实现割刀割深均匀稳定,适应不同割胶需求,降低橡胶树损伤。以螺旋线升角、割刀运行速度、耗皮量为试验因素,以割胶机能耗、耗皮量变异系数为试验指标,进行三因素三水平正交试验。试验结果表明:螺旋线升角为25°、割刀运行速度为0.6 m/min、耗皮量为0.8 mm时,试验结果最优,平均耗电量为0.48 W·h,耗皮量变异系数为7.61%,割深变异系数为4.78%,试验结果满足要求。

关键词: 天然橡胶; 固定式; 自动割胶; 电动割胶; 增程式

中图分类号: S225.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0128-08

Design and Experiment of Fixed Automatic Natural Rubber Tapping Machine

WEN Xiangyu^{1,2} HONG Yuanmei³ XIONG Jianming⁴ YU Yigang⁴ TAN Jianhui³ MENG Xiangbao^{1,2}

(1. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China
2. Key Laboratory of Modern Agricultural Intelligent Equipment in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510630, China
3. Shenzhen Institute of Modern Agricultural Equipment, Shenzhen 518022, China
4. Dongguan Yishun Intelligent Technology Co., Ltd., Dongguan 523920, China)

Abstract: In order to solve the problems of high labor intensity, shortage of rubber cutters and low efficiency of natural rubber tapping at night, a fixed automatic natural rubber tapping machine was designed. Moving motor and screw motor were used to drive the rubber cutter to rotate around the tree and move in the vertical direction, respectively. The two movements were combined to form the spiral line operation track of rubber cutter, so that the cutter can adjust the spiral line angle according to the growth of the rubber trees to ensure smooth rubber discharge. The screw motor was matched with the rotary encoder to adjust the rubber consumption of the rubber tapping machine, and double profiling springs were mounted to ensure uniform and stable cutting depth, overall, meeting different rubber tapping requirements, and reducing damage of rubber trees. A three factor and three level orthogonal experiment was conducted with the spiral angle, cutting speed, and rubber consumption as experimental factors, and the cutting machine energy consumption and the variation coefficient of rubber consumption as experimental indicators. The experimental results showed that the optimal results were obtained when the helix angle was 25°, the cutting speed was 0.6 m/min, and the rubber consumption was 0.8 mm. The average power consumption was 0.48 W·h, the variation coefficient of rubber consumption was 7.61%, and the variation coefficient of cutting depth was 4.78%. The experimental results met the requirements.

Key words: natural rubber; fixed; automatic rubber cutting; electric rubber cutting; increased program

收稿日期: 2023-06-31 修回日期: 2023-08-31

基金项目: 省属科研机构稳定性支持项目(粤科资字[2021]133号)、广东省级乡村振兴战略专项(粤财农[2022]152号)、“十四五”广东省农业科技创新十大主攻方向“揭榜挂帅”项目(2022SDZG03)和广州市科技计划项目(2023A04J0992)

作者简介: 温翔宇(1992—),男,工程师,博士,主要从事农业机械设计研究,E-mail: 505311404@qq.com

通信作者: 孟祥宝(1968—),男,教授级高级工程师,主要从事数字农业与智能装备技术研究,E-mail: mengxb@e-jiankun.com

0 引言

天然橡胶与钢铁、石油、煤炭并称为四大工业原料,是国计民生和国防战略不可或缺的资源紧缺性战略物资^[1-2],主要通过刀具割破橡胶树乳管,收集排出的胶乳,经后期加工获得^[3-4]。因此割胶是天然橡胶生产的中心环节^[5],为保证产胶量通常在凌晨进行割胶作业,环境艰苦且劳动强度大,属于劳动密集型工作^[6]。但现阶段天然橡胶价格低迷^[7],经济效益不佳,割胶工人转入其他行业,劳动力严重不足,部分橡胶林属于弃割弃管的状态^[8-9],导致我国天然橡胶自给率偏低^[10],连续 9 年自给率不足 20%,远低于国际公认的自给率安全保障线。因此,急需研发新型割胶装备以降低割胶工人劳动强度、提高作业效率。

为替代对人工高度依赖的传统割胶模式,国内外学者在自动割胶方面开展了大量研究,目前新型割胶装备主要分为便携式割胶刀、固定式割胶机和移动式割胶机器人。便携式割胶刀在一定程度上能降低割胶的技术难度和胶工劳动强度,张春龙等^[11]设计一种锯切式割胶刀,研究锯片直径、锯片齿数、切割电机转速、进给速度对锯切式割胶装置切割功耗的影响。文献[12-14]研制了 4GXJ 系列便携式电动割胶刀,采用平切的方式实现对树皮的切削,与传统割胶刀进行对比试验,在橡胶树的耗皮和割面方面,电动割胶刀割胶效果接近于传统胶刀,在切割老胶线方面,电动胶刀明显优于传统胶刀。

固定式割胶机需在每棵橡胶树上配置一台,通过定时器控制凌晨自动开启进行割胶作业,胶工无需在凌晨点灯割胶,仅白天收胶即可。张喜瑞等^[15]设计一种仿形进阶式天然橡胶割胶机,通过林间割胶试验,以排胶量和平均耗电量为指标,确定电机转速、刀具螺旋升角、拉簧预紧力 3 个因素最优值。汪雄伟等^[16]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。高可可等^[17]采用高分子材料研制一种固定式割胶机,提出一种先扫描后切割的割胶控制方式,利用超声波传感器预先扫描树围,通过建立测量误差控制模型得到刀尖与树皮的距离,利用 PID 控制算法控制刀具进给量。

移动式割胶机器人实现了“一机多树”的割胶作业模式,机器利用率高,保养维护方便。NIE 等^[18]研发林间智能割胶机器人,综合运用视觉伺服、多传感器一体的组合导航、无线充电等技术,实现机器人在林间自主导航、移动、定位,并自主到达相应的作业位置。文献[19-20]研制移动式天然橡胶割胶机器人,

在橡胶林中铺设轨道,利用机器视觉和机械臂驱动末端执行器进行割胶作业,试验结果表明,在割胶机器人切割厚 1 mm 的橡胶树皮时,耗皮量误差约为 0.28 mm,切割深度误差约为 0.49 mm。

目前 3 种新型割胶装备各有优缺点,固定式割胶机“一机一树”,可实现万台机器同时割胶,作业效率高,大幅降低胶工劳动强度,但前期投入大,维护成本高,因此,降低割胶机成本、提高机具可靠性是固定式割胶机急需解决的问题。本文拟设计一种固定式天然橡胶自动割胶机,采用双电机分别驱动割胶刀绕树转动以及沿竖直方向运动,两种运动复合形成割胶刀螺旋线作业轨迹,实现割胶机根据橡胶树生长状况调节螺旋线升角,保证排胶顺畅。通过太阳能板增加割胶机电池续航能力,减少割胶机电池充电次数,降低维护成本。通过试验研究影响割胶机能耗、耗皮量变异系数的因素,对割胶机进行参数优化,为新型自动割胶装备的研发提供参考。

1 割胶机整体结构与工作原理

1.1 整体结构

固定式天然橡胶自动割胶机主要由固定装置、割刀行走机构、收放刀机构、驱动控制模块、太阳能增程模块组成。固定装置内圈设有楔形凸起机构,用于增大割胶机与树体之间的摩擦力,固定装置外部设有上下两排完全相同的齿圈,中间形成卡槽,绑带穿过其中将割胶机固定在橡胶树上。割刀行走机构由 2 个电机驱动,行走电机直连的齿轮与固定装置外齿圈啮合,驱动割刀绕树转动;丝杆电机驱动丝杆转动,与铝型材、刀座构成线性模组,实现割刀竖直方向上的运动,2 种运动复合形成割胶刀螺旋线作业轨迹。丝杆电机与丝杆之间设有旋转编码盘,每次启动割胶时,割胶刀需要下降等距的位置,旋转编码盘每转一格即为此等距下降距离,光电开关对准旋转编码盘上圆周均布的通孔,起到当旋转编码盘转动一格时,发起启停信号的作用。收放刀机构由控刀电机驱动摆杆转动至初始位置 180°分度,通过拉簧拉动刀杆将刀头探出,并紧紧贴合在树皮表面,割胶作业时,在拉簧和扭簧的共同作用下实现割刀对树皮表面的仿形功能。驱动控制模块控制割胶机的 3 个电机按指定逻辑顺序作业,太阳能增程模块为割胶机电池充电。割胶机整体结构如图 1 所示。

1.2 工作原理

进行割胶作业时,丝杆电机带动旋转编码盘和丝杆逆时针转动,与丝杆螺纹配合的刀座沿铝型材方向整体向下平移,当光电开关感应到旋转编码盘

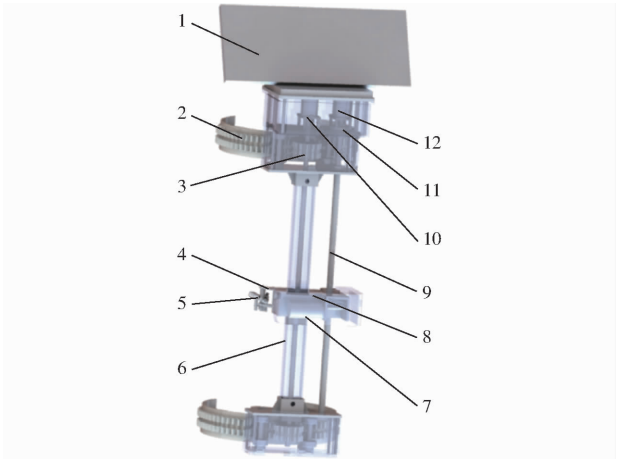


图 1 割胶机总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of fixed natural rubber automatic tapping machine

1. 太阳能板 2. 固定装置 3. 齿轮 4. 刀杆 5. 刀头 6. 铝型材 7. 控刀电机 8. 刀座 9. 丝杆 10. 行走电机 11. 旋转编码盘 12. 丝杆电机

转动 1 格时,丝杆电机停止,刀座割刀下降指定距离。控刀电机开始启动,驱动摆杆转动,通过拉簧牵引刀杆末端,将刀头探出贴合在树皮表面,摆杆转至初始位置 180°分度时控刀电机停止,放刀动作执行完毕。此时,行走电机、丝杆电机同时启动,分别驱动割刀绕树转动以及沿竖直方向上移,两种运动复合形成割胶刀螺旋线作业轨迹,执行割胶作业,割胶机整体向固定装置端部移动,当霍尔元件感应到固定装置端部的磁柱时,行走电机、丝杆电机停止,控刀电机反向转动,摆杆推动割胶刀收回复位。随后行走电机、丝杆电机反向转动,待割胶机回复初始位置时,行走电机、丝杆电机停止,至此完成一次割胶作业。可通过更改旋转编码盘圆周均布通孔的间距,实现耗皮量的调整;更换不同减速比的行走电机、丝杆电机,调整割胶刀螺旋线作业轨迹的螺旋线升角,太阳能板日间为割胶机蓄电池进行充电。所研制的割胶机参数如表 1 所示。

表 1 割胶机参数

Tab. 1 Parameters of automatic rubber tapping machine

参数	数值
耗皮量/mm	0.8 ~ 1.6
割胶深度/mm	5 ~ 7 (自适应割胶)
切割角度/(°)	25 ~ 35
耗皮量切割精度/mm	± 0.2
平均运行速度/(m·min ⁻¹)	0.3 ~ 0.9
空载续航次数/次	≥ 200
信号响应时间/s	≤ 10
接通率/%	≥ 99.99
工作时间/s	≤ 60

2 关键部件设计

2.1 固定装置

固定装置内设楔形凸起机构,自然状态下可适配树围 600 mm 的橡胶树,固定装置外设 3/4 圆齿圈,齿数 90,模数 2.5 mm。固定装置外齿圈分度圆直径计算公式为

d = mz (1)

其中 z = \frac{4}{3} z_1 (2)

式中 d——齿圈分度圆直径,mm

m——齿圈模数,mm

z——整圈齿数

z₁——固定装置外齿圈齿数

经计算,分度圆直径为 300 mm。同时固定装置具有弹性,可在一定程度上适配不同树围的橡胶树。

2.2 割刀行走机构

如图 2 所示,割刀行走机构由行走电机、丝杆电机、丝杆、铝型材、齿轮等构成,行走电机与齿轮直连,驱动割胶机沿固定装置运动,丝杆电机与丝杆通过旋转编码盘连接,与铝型材、刀座组成线性模组,丝杆电机转动将使刀座沿竖直方向运动。

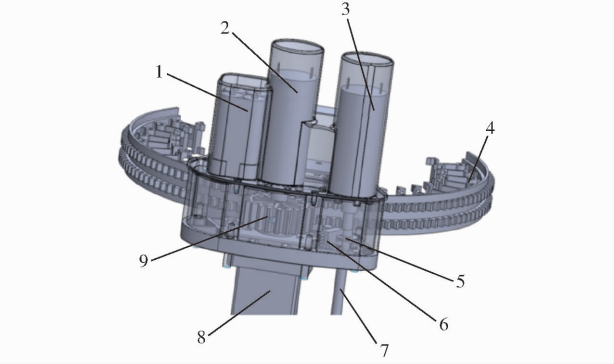


图 2 割刀行走机构结构示意图

Fig. 2 Schematic of cutter moving mechanism

1. 电池组 2. 行走电机 3. 丝杆电机 4. 固定装置 5. 旋转编码盘 6. 光电开关 7. 丝杆 8. 铝型材 9. 齿轮

齿轮与固定装置外齿圈啮合,齿轮齿数 20,模数 2.5 mm,则分度圆直径为 50 mm,齿轮与固定装置外齿圈传动比为 6 : 1。直流电机额定转速 6 300 r/min,配置不同减速比的齿轮组进行预试验,当减速比小于 700 时,割胶机运行速度较快,割面毛刺碎屑较多,不利于排胶。减速比为 700 时,电机实际输出转速 9 r/min,割刀行走 1/2 树围,经计算割胶机运行速度约为 0.9 m/min。采用调速模块调整电机转速,当电机实际输出转速降低至 3 r/min 时,电机转矩满足割胶需求,则割胶机运行速度为 0.3 ~ 0.9 m/min。

在 1/2 树围割制下,割胶螺旋线作业轨迹如图 3 所示,螺旋升角 α 为

$$\alpha = \arctan \frac{H}{L} \tag{3}$$

式中 H ——割刀在竖直方向上提升的高度,mm
 L ——1/2 树围,mm

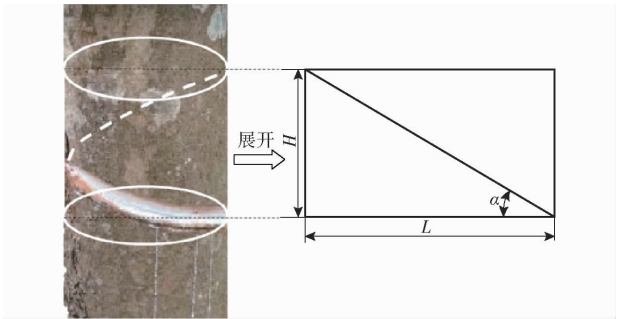


图 3 割胶螺旋线轨迹示意图

Fig. 3 Schematic of tapping trajectory

根据农业行业标准 NY/T 1088—2020《橡胶树割胶技术规程》,阳刀割胶割线斜度应大于等于 25°,本割胶机作业轨迹螺旋线升角拟设置在 25°~35°范围内可调,根据式(3)计算割刀在竖直方向上提升的高度 H 在 140~210 mm 之间。

割胶时间与刀具在 x 方向和 y 方向的运动速度关系式为

$$t = 60 \frac{L}{v_x} = 60 \frac{H}{v_y} \tag{4}$$

式中 v_x ——刀具在 x 方向上运动速度,m/min
 v_y ——刀具在 y 方向上运动速度,m/min
 t ——割胶作业持续时间,s

根据式(3)、(4)计算, v_y 为 0.14~0.63 m/min,丝杆选用 5 线梯形丝杆,螺距 2 mm,则丝杆导程为 10 mm,即丝杆每转一圈,割刀在竖直方向上提升 10 mm。丝杆最大转速应达到 63 r/min,电机选用额定转速 6 300 r/min,齿轮组减速比为 100,即可满足要求,配置调速模块使电机转速在 14~63 r/min 范围内可调。本割胶机可通过改变行走电机、丝杆电机速比,实现螺旋线升角在 25°~35°范围内快速调整。

2.3 耗皮量调节机构

如图 4 所示,在割胶作业前,丝杆电机逆时针转动,旋转编码盘转动 1 格时停止,刀座下降指定距离后执行推刀动作开始割胶。因此,本割胶机可通过更换旋转编码盘,实现不同耗皮量割胶作业。

农业行业标准 NY/T 1088—2020《橡胶树割胶技术规程》中建议阳刀割胶每刀树皮消耗量控制在 1.6~1.7 mm 之间,根据预试验、橡胶树品种与实际试验情况,耗皮量 0.8 mm 以上时也均可正常排胶,

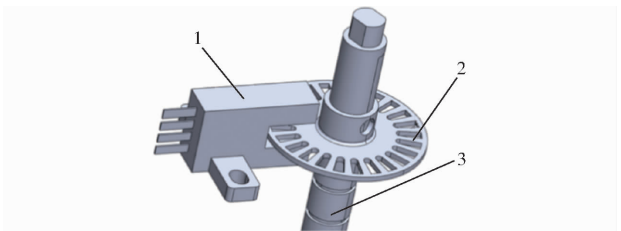


图 4 耗皮量调节机构结构示意图

Fig. 4 Schematic of adjusting device of rubber consumption

1. 光电开关 2. 旋转编码盘 3. 丝杆

因此根据丝杆每转一圈导程 10 mm,设计 3 种不同孔间距的旋转编码盘,通过替换旋转编码盘实现耗皮量 0.8、1.2、1.6 mm 3 种挡位调节,以便进行试验。

2.4 收放刀机构

收放刀机构由控刀电机、接近开关、摆杆、拉簧、刀杆、扭簧、割胶刀、刀头和刀座等组成(图 5),控刀电机与摆杆一端相连,刀杆中部铰接在刀座上,摆杆另一端与刀杆末端通过拉簧连接,刀头通过扭簧安装在刀杆首端,刀头上装有可调节割胶深度的割胶刀。

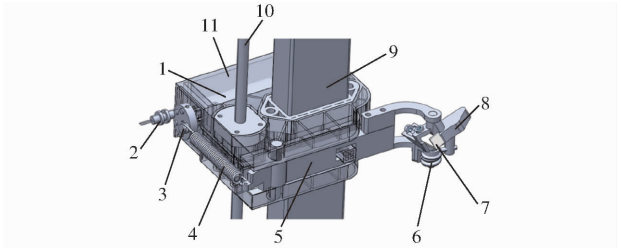


图 5 收放刀机构结构示意图

Fig. 5 Schematic of cutter retraction mechanism

1. 控刀电机 2. 接近开关 3. 摆杆 4. 拉簧 5. 刀杆 6. 扭簧
7. 割胶刀 8. 刀头 9. 铝型材 10. 丝杆 11. 刀座

作业时控刀电机驱动摆杆转动,通过拉簧拉动刀杆末端,将刀头探出紧紧贴合在树皮表面,收放刀机构是割胶机核心部件,决定割胶作业效果,根据刀头与树体之间的距离,设计摆杆行程、刀杆与刀座铰接位置、弹簧刚度等参数,弹簧刚度过大,控刀电机功耗增加,弹簧刚度过小,刀头与树皮贴合度不佳,仿形效果差。

2.5 驱动控制模块

根据割胶机工作原理开发控制板,通过 3 个 L298N 型直流电机驱动模块分别对行走电机、丝杆电机和控刀电机进行控制,实现割刀行走机构的割胶运动、收放刀机构的等距下降运动以及收刀和放刀动作。控制板和驱动模块通过外部接入 12 V 直流电源提供电力,以实现电机的正常运行,通过太阳能增程模块实现对电源的自动充电,整机控制流程图如图 6 所示。

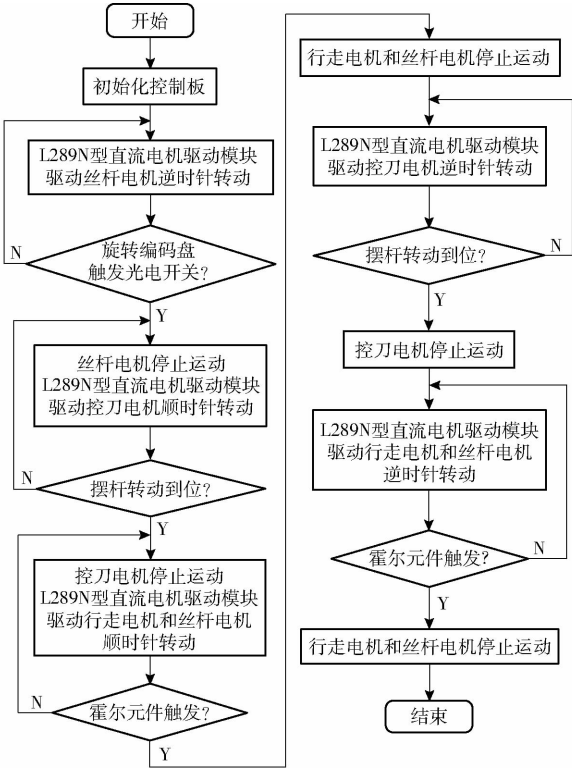


图 6 割胶机控制模块控制流程图

Fig. 6 Control flowchart of control module of rubber cutting machine

行走电机和丝杆电机选用直流减速电机,其额定电压为 12 V 直流电压,行走电机和丝杆电机协同工作,为割胶运动提供所需的动力输入,丝杆电机作为等距下降运动的动力输入;控刀电机额定电压为 12 V 直流电压,为收刀和放刀动作提供动力输入。考虑到信号干扰和控制板接线的问题,选用 12 V 直流电源为整机供电。为确保割胶机在胶林环境中能够长时间运行,参考电动割胶刀单次割胶的耗电量,选用容量为 2 500 mA·h 的锂电池组作为电源。同时,通过太阳能增程模块,充分利用太阳能资源,实现电源的自动充电功能,以提升割胶机的续航能力。

3 试验

为便于探究试验因素对割胶机作业性能的影响,选用茂名市高州市火星农场橡胶树树段制作试验台(图 7),橡胶树品种为 114 品系,采用阳刀割胶,每次割 1/2 树围。

3.1 试验指标

3.1.1 耗皮量变异系数和割深变异系数

对于割胶机一次割胶所割下的树皮,随机选取 10 个位置,用精度 0.01 mm 的游标卡尺测量其耗皮量,进行耗皮量变异系数计算,计算式为

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{m}} \times 100\% \quad (5)$$



图 7 台架试验

Fig. 7 Bench test

其中

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}$$
$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$$

式中 C_v ——耗皮量或割深变异系数
 σ ——标准差,mm
 n ——测量点数量
 m_i ——各个测量点耗皮量或割深,mm
 $\bar{m}$ ——耗皮量或割深平均值,mm

割胶深度是指割去树皮的内切口与形成层的距离。因形成层在树皮内部,难以观测,本试验测量橡胶树径向上树皮表面与内切口之间的距离,随机选取 10 个位置测量数据,同样采用式(5)计算割深变异系数。

3.1.2 割胶机功耗

割胶机控制板中植入电流电力监控芯片,支持 3 路电机监测,记录电机两端电压和流经电机的实时电流,通过积分的方式计算割胶作业过程中电机的功耗,电机所作的总功为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} UI dt \quad (6)$$

式中 W ——电机所作的总功, W·h
 U ——电机两端电压, V
 I ——割胶时流经电机的实时电流, A
 t_1 ——割胶开始时间, s
 t_2 ——割胶结束时间, s

3.2 试验结果分析

通过预试验发现,割刀运行速度、螺旋线升角、耗皮量影响割胶机功耗、耗皮量变异系数,设计三因素三水平正交试验,各因素的取值如表 2 所示。每组试验重复割胶 3 次,取平均值作为试验结果。

试验方案与结果如表 3 所示, A、B、C 为割刀运行速度、耗皮量、螺旋线升角编码值,通过极差分析可知影响割胶机功耗的因素主次顺序为螺旋线升角 C、割刀运行速度 A、耗皮量 B,各因素最优组合为 $A_2B_1C_1$,影响耗皮量变异系数的因素主次顺序为割

表 2 试验因素编码

Tab.2 Code of experimental factors

编码	因素		
	割刀运行速度	耗皮量	螺旋线升角
	$X_1/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	X_2/mm	$X_3/(^{\circ})$
-1	0.3	0.8	25
0	0.6	1.2	30
1	0.9	1.6	35

表 3 试验结果与极差分析

Tab.3 Results of experiment and range analysis

试验 序号	因素			目标函数	
	割刀运行 速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	耗皮量/ mm	螺旋线 升角/ ($^{\circ}$)	割胶机功 耗 $Y_1/$ ($\text{W}\cdot\text{h}$)	耗皮量变 异系数 $Y_2/\%$
1	0.3	0.8	25	0.51	6.47
2	0.3	1.2	30	0.69	7.14
3	0.3	1.6	35	0.82	8.13
4	0.6	0.8	30	0.44	8.32
5	0.6	1.2	35	0.59	9.26
6	0.6	1.6	25	0.48	9.15
7	0.9	0.8	35	0.57	9.90
8	0.9	1.2	25	0.45	10.05
9	0.9	1.6	30	0.63	10.62
割胶机功耗	k_1	0.67	0.51	0.48	
	k_2	0.50	0.58	0.59	
	k_3	0.55	0.64	0.66	
	R	0.17	0.14	0.18	
	较优水平	A_2	B_1	C_1	
耗皮量变异系数	主次因素	$C>A>B$			
	k_1	7.25	8.23	8.56	
	k_2	8.91	8.82	8.69	
	k_3	10.19	9.30	9.10	
	R	2.94	1.07	0.54	
	较优水平	A_1	B_1	C_1	
	主次因素	$A>B>C$			

刀运行速度 A 、耗皮量 B 、螺旋线升角 C ，各因素最优组合为 $A_1B_1C_1$ 。通过方差分析，对各因素影响割胶机功耗和耗皮量变异系数进行显著性检验，如表 4、5 所示。

表 4 割胶机功耗方差分析

Tab.4 Variance analysis of rubber tapping machine power consumption

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	0.12	6	0.021	264.57	0.003 8 **
A	0.046	2	0.023	297.57	0.003 3 **
B	0.028	2	0.014	180.14	0.005 5 **
C	0.049	2	0.025	316.00	0.003 2 **
残差	1.56×10^{-4}	2	7.78×10^{-5}		
总和	0.12	8			

注：** 表示极显著($p<0.01$)，下同。

表 5 耗皮量变异系数方差分析

Tab.5 Variance analysis of variation coefficient of rubber consumption

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	15.26	6	2.54	317.56	0.003 1 **
A	13.07	2	6.53	815.94	0.001 2 **
B	1.72	2	0.86	107.52	0.009 2 **
C	0.47	2	0.24	29.52	0.032 8 *
残差	0.016	2	8.01×10^{-3}		
总和	15.28	8			

注：* 表示显著($p<0.05$)。

由表 4 可知，割刀运行速度 A 、耗皮量 B 、螺旋线升角 C 对割胶机功耗影响极显著。随着耗皮量增加，割胶机功耗增高。割胶作业轨迹螺旋线升角增加，割胶行程变长，功耗随之增加。

由表 5 可知，割刀运行速度 A 、耗皮量 B 对耗皮量变异系数影响极显著，螺旋线升角 C 对耗皮量变异系数影响显著。由于树皮表面有起伏，随着割刀运行速度增加，仿形机构贴合树皮表面效果变差，耗皮量变异系数增加。耗皮量增加，割刀切割阻力变大，刀杆出现抖动，降低了割胶稳定性，耗皮量变异系数增加。

为了达到兼顾平衡各项指标的目的，采用综合加权评分法进行分析，以选出令各项指标都尽可能最优的组合。考虑到 3 个因素对衡量指标的重要程度，以 100 分作为总“权”，割胶机功耗和耗皮量变异系数各为 50 分，试验的综合加权结果如表 6 所示。

表 6 综合加权结果

Tab.6 Result of integrated weighted

参数	A	B	C
K_1	527.76	497.52	498.80
K_2	520.78	546.36	845.84
K_3	585.48	590.14	589.37
k_1	175.92	165.84	166.27
k_2	173.59	182.12	181.95
k_3	195.16	196.71	196.46
R	21.57	30.88	30.19
最优水平	A_2	B_1	C_1

通过表 6 分析得出各试验因素对试验指标（割胶机功耗、耗皮量变异系数）影响的最优组合，影响因素大小排列顺序为 B 、 C 、 A ，各因素最佳水平组合为 $A_2B_1C_1$ ，即耗皮量 0.8 mm、螺旋线升角 25° 、割刀运行速度 0.6 m/min。

3.3 林间验证试验

为验证割胶机作业性能，于 2023 年 4 月在广东

省茂名市高州市火星农场进行试验(图8),橡胶树品种为114品系,割制为每2天割1刀,1/2树围,阳刀割胶。在耗皮量0.8 mm、螺旋线升角25°、割刀运行速度0.6 m/min参数下进行验证试验,平均耗电量为0.48 W·h,耗皮量变异系数为7.61%,割深变异系数为4.78%,试验结果满足要求。



图8 林间验证试验

Fig.8 Forest test for fixed natural rubber automatic tapping machine

4 结论

(1)设计了一种固定式天然橡胶自动割胶机,采用双电机分别驱动割胶刀绕树转动以及沿竖直方向运动,2种运动复合形成割胶刀螺旋线作业轨迹。配合收放刀机构,实现推刀、割胶、收刀、复位作业流程,解决天然橡胶夜间割胶作业劳动强度大、割胶工短缺等问题。

(2)所设计的固定式天然橡胶自动割胶机,可通过改变双电机速比,实现螺旋线升角在25°~35°范围内快速调整,可通过更换旋转编码盘,实现不同耗皮量割胶作业。通过太阳能板增加割胶机电池续航能力,减少割胶机电池充电次数,降低维护成本。

(3)进行台架试验与林间试验验证,最优参数组合耗皮量0.8 mm、螺旋线升角25°、割刀运行速度0.6 m/min条件下,平均耗电量为0.48 W·h,耗皮量变异系数为7.61%,割深变异系数为4.78%,试验结果满足要求。

参 考 文 献

[1] 高宏华,黄云生,校现周,等. 浅议机械化采割的紧迫性和可行性[J]. 中国热带农业,2015(4):10-13.
GAO Honghua, HUANG Yunsheng, XIAO Xianzhou, et al. Urgency and feasibility of mechanized exploitation of rubber tree[J]. China Tropical Agriculture, 2015(4):10-13. (in Chinese)

[2] 曾霞,郑服丛,黄茂芳,等. 世界天然橡胶技术现状与展望[J]. 中国热带农业,2014(1):31-36.
ZENG Xia, ZHENG Fucong, HUANG Maofang, et al. Present situation and prospect of world natural rubber technology[J]. China Tropical Agriculture, 2014(1):31-36. (in Chinese)

[3] 张燕,蔡维,史留勇. 基于容栅传感机理的橡胶树皮厚度测量仪特性实验分析[J]. 中国农机化学报,2015,36(6):235-237,243.
ZHANG Yan, CAI Wei, SHI Liuyong. Properties analysis of the rubber bark thickness measuring instrument based on capacitive sensing mechanism[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(6):235-237, 243. (in Chinese)

[4] 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 research of tapping technology of natural rubber tree[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(2):27-31. (in Chinese)

[5] 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.
QIU Jian, YANG Wenfeng, WEI Fang, et al. Analysis and suggestions of natural rubber harvesting situation in China[J]. China Tropical Agriculture, 2021(5):7-12. (in Chinese)

[6] 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)

[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] 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)

[9] 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)

[10] 金华斌,田维敏,史敏晶. 我国天然橡胶产业发展概况及现状分析[J]. 热带农业科学,2017,37(5):98-104.
JIN Huabin, TIAN Weimin, SHI Minjing. Current situation and industrial development of natural rubber in China[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2017, 37(5):98-104. (in Chinese)

[11] 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)

[12] 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.

ZHENG Yong, ZHANG Yishan, CAO Jianhua, et al. The influence of the rubber tree tapped and latex production characteristics using type 4GXJ-I of portable cordless brushless tapping knife[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(9): 1725 – 1735. (in Chinese)

[13] 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.

CHEN Warong, XIAO Suwei, JIA Qian, et al. Transmission structure design and motion simulation analysis of 4GXJ-2 electric rubber tapping knife[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2021, 34(4): 24 – 31. (in Chinese)

[14] 陈娃容, 黄敞, 邓祥丰, 等. 4GXJ-2 型电动割胶刀散热叶片的轴流气动性能分析与优化设计[J]. 东莞理工学院学报, 2021, 28(3): 107 – 113.

CHEN Warong, HUANG Chang, DENG Xiangfeng, et al. Axial aerodynamic performance of 4GXJ-2 electric rubber tapping knife cooling blade analysis and optimization design[J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2021, 28(3): 107 – 113. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 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)

[17] 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)

[18] NIE Fuyu, ZHANG Weimin, WANG Yang, 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.

[19] 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)

[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.