

# 固定式割胶机器人割胶误差分析与精度控制

高可可, 孙江宏, 高 锋, 焦 健

(北京信息科技大学机电工程学院, 北京 100192)

**摘 要:** 针对固定式自动割胶设备成本高、质量大和割胶精度低等问题, 该研究提出一种采用高分子材料制作的固定式割胶机器人, 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。为减少进退刀次数和降低电机功率损耗, 根据橡胶树皮结构和割胶技术规程, 将切割深度从 5.5 mm 调整为 5.2~5.8 mm, 并进行试验验证。结果表明: 固定式割胶机器人割胶时螺旋角为 25°~30°, 其控制方式可保证刀尖到达目标位置, 且 1 次走刀即可完成割胶工作, 有效切割时间仅为 22 s, 相比于传统人工割胶 (需多次走刀, 有效切割时间为 1 min), 该割胶机器人的割胶效率提高了 63%, 可实现快速精准割胶。在固定的切割深度范围内作业时, 进退刀次数减少 36%; 刀具电流变化幅度最大减小 4.11%。该研究设计的固定式割胶机器人及控制方式不损伤橡胶树, 可替代人工作业, 提高割胶效率, 具有一定的推广应用价值。

**关键词:** 橡胶; 机械化; 收获; 误差分析; 固定式; 螺旋线

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.006

中图分类号: S225.93

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-2-0044-07

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.006 http://www.tcsae.org

Gao Keke, Sun Jianghong, Gao Feng, et al. Tapping error analysis and precision control of fixed tapping robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(2): 44-50. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.006 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

橡胶作为工业设备和生活用品的制造原料, 在工业生产、医疗卫生和日常生活中有着举足轻重的作用, 是重要经济支柱<sup>[1-3]</sup>。切割橡胶是获取天然橡胶的中心环节和关键技术环节<sup>[4-5]</sup>, 割胶方法是收获天然橡胶的关键, 而割胶机械直接决定割胶效率、伤树程度、作业强度和橡胶产量<sup>[6-8]</sup>。目前市场上还是以传统的人工割胶方式为主, 对劳动者的体能和技术要求较高, 且生产效率低、工作模式复杂和劳动投入高, 已无法满足橡胶产业的发展需要<sup>[9-10]</sup>, 因此, 采用自动化割胶设备获取天然橡胶将是解决橡胶行业困境的首选方法<sup>[11]</sup>。

已有的割胶设备主要有电动割胶刀、移动式割胶机器人和固定式割胶机器人。其中印度和日本主要应用为电动割胶刀<sup>[12-15]</sup>。但电动割胶刀需人工手持操作, 并未完全代替人工操作。吴思敏等<sup>[16-18]</sup>针对移动式割胶机器人进行了研究, 但受橡胶林间环境和图像识别误差等因素的影响, 移动式割胶机器人的割胶精度低, 且再次割胶时无法同上次割胶刀痕完全吻合, 造成割胶轨迹杂乱甚至损伤橡胶树结构。

固定式割胶机器人采用固定架和导轨将设备固定于树干上, 相对于移动式割胶机器人具有结构坚固和设备维护简单便利等优势, 可忽略橡胶林间环境以及图像识别等, 实现快速、精准割胶。艾哈迈德等发明一种捆绑式全自动智能割胶机<sup>[19-20]</sup>, 由割胶机械动力、刀头、导轨与芯片程序控制 5 部分组成, 使用固定架和导轨将机器架于树上, 但该机器使用成本远超过橡胶的收益, 未能在生产上大面积推广应用。张春龙等<sup>[21]</sup>针对固定式割胶器械研制了一种激光测距式割胶试验平台, 该平台采用不同路径激光采点进行测距, 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。但该割胶实验平台的研究没有解决因树干弯曲造成的割胶设备安装偏心问题。许振昆等<sup>[22-23]</sup>发明了一种固定式割胶机, 该割胶机械由割胶机械动力、刀头、导轨与芯片程序控制系统等部分组成, 采用固定架和导轨将割胶机架于树上, 可完全替代人工。但该机器人采用定值深度割胶, 且无割胶精度控制。

结合国内橡胶种植与收获特点<sup>[24]</sup>, 本文研制了一种固定式割胶机器人, 该机器人采用高分子材料制作加工。利用超声波测量技术, 将先扫描后切割的控制方式应用于橡胶精准切割, 通过控制 3 个方向的电机实现刀具按规划的空间螺旋曲线路径运动, 具有割胶精度高、整机质量轻和集成度高等特点。

## 1 固定式割胶机器人结构与工作原理

### 1.1 总体结构

固定式割胶机器人结构如图 1 所示, 该机器人主要由夹

收稿日期: 2020-11-12 修订日期: 2021-01-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0701505); 促进高校内涵发展项目 (5121911002)

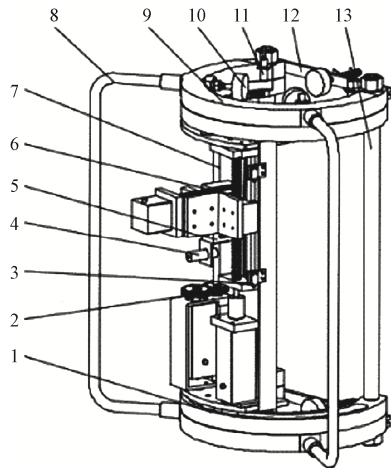
作者简介: 高可可, 研究方向为机械设计及其理论。

Email: 1633394501@qq.com

※通信作者: 孙江宏, 博士, 教授, 研究方向为农业机器人技术研究。

Email: 278796059@qq.com

持机构、割胶工作台、组合滚柱丝杠副和测量限位模块等组成。其中割胶工作台由运动转轴、刀具夹持结构、刀具、电容式传感器和测距传感器组成, 除割胶工作台外, 割胶机支撑结构采用高分子材料制作, 整机质量为 33 kg。在橡胶树产胶期内将割胶机器人固定在树干上, 通过固定脚座进行定位和无损夹持, 期间不进行拆卸, 机器人可循环切割。



1.轨道齿圈 2.传动齿轮 3.限位传感器 4.超声波传感 5.刀具 6.滚珠丝杠 7.传动轴 8.U形支撑架 9.齿圈架 10.固定脚座 11.圆周限位传感器 12.夹持固定架 13.支撑杆  
1.Orbital ring gear 2.Transmission gear 3.Spacing sensor 4.Ultrasonic sensor 5.Cutter rest 6.Ball screw 7.Drive shaft 8.U-shaped support frame 9.Ring gear rack 10.Fixed foot 11.Circle limit sensor 12.Clamping fixture 13.Support rod

图1 固定式割胶机器人结构组成

Fig.1 Structure composition of the fixed tapping robot

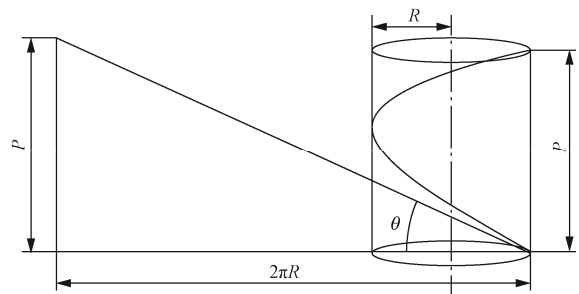
割胶机器人夹持结构采用三点定位工作原理, 通过上下 2 个齿圈架上各 3 个橡胶固定脚座进行夹持, 可根据不同树径调节其距机器人轴线的距离。橡胶固定脚座夹持面为硬质橡胶, 夹持面受力后变为弧形, 使接触面积和摩擦力增大, 保证夹持和运行过程中稳定。

割胶机器人夹持固定在橡胶树干上后, 通过控制圆周方向和上下方向的电机速度  $V$ , 把直线运动和圆周运动合成为空间螺旋运动, 实现刀具按规划的空间螺旋线路径运动。其中圆周方向运动利用步进电机输出轴与齿轮连接, 通过齿轮啮合使传动轴转动, 通过传动轴下端的齿轮与轨道齿圈啮合完成圆周运动; 沿树干方向上下运动的电机通过滚珠丝杠传动力矩和转速, 滚珠丝杠有效运动行程为 200 mm, 因刀具运动空间限制, 在一个切割周期内可控制刀具对橡胶树切割 180 次。通过滚珠丝杠将电机回转运动转化为刀具的直线运动, 具有精度高、效率高和运动可逆等特点。

## 1.2 割胶轨迹规划

割胶轨迹决定割胶质量且直接影响剖面的连续性与割深准确性。固定式割胶机器人的割胶运动通过圆周方向和沿树干上下方向的运动轨迹组合而成, 控制刀具路径为螺旋线, 形成自右下到左上的空间螺旋割线。如图 2 所示, 将橡胶树干简化成标准圆柱体, 切割树皮时, 当刀具在圆周方向运动距离为  $2\pi R$  时, 其在上下方向运动距离为  $P$ , 螺旋角为  $\theta$ , 则  $\tan\theta = P/(2\pi R)$ 。当切割螺旋角  $\theta$  一定时, 刀具在 2 个方向运动距离之比为定值。设刀具

上下运动的线速度为  $V_1$ , 圆周运动的线速度为  $V_2$ , 则在相同时间内,  $V_1/V_2 = \tan\theta$ 。在切割过程中, 控制两电机按定比值  $\tan\theta$  进行运动, 即可得到切割螺旋线。



注:  $R$  为橡胶树干半径, mm;  $P$  为刀具上下运动距离, mm;  $\theta$  为螺旋角, ( $^\circ$ )。

Note:  $R$  is the radius of the rubber tree, mm;  $P$  is the distance of the cutter moved up and down, mm;  $\theta$  is the helix angle, ( $^\circ$ ).

图2 理论割胶轨迹

Fig.2 Theoretical tapping trajectory

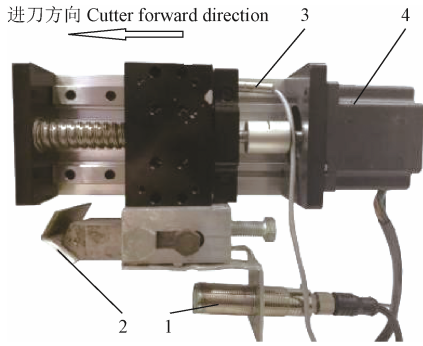
## 2 割胶误差分析

### 2.1 误差构成与测量

固定式割胶机器人的割胶轨迹通过圆周方向电机和沿树干的上下方向电机配合运动, 控制刀具路径为螺旋线, 形成自右下到左上的空间螺旋割线。但由于橡胶树形状并非标准圆柱形, 在实际切割橡胶树时会产生安装误差和测量误差, 进而产生切割误差。其中安装误差是由于树干弯曲造成的割胶机器人与橡胶树干安装偏心而产生的。测量误差由超声波传感器与刀尖之间的横向距离引起, 割胶机器人固定到橡胶树干上时, 超声波传感器安装位置位于树干径向方向, 刀具刀柄与超声波传感器平行安装, 因超声波传感器中心与刀尖之间存在横向间距, 造成刀尖没有正对树干径向方向, 导致传感器测得的距树皮的距离并非刀具刀尖距树皮的实际距离。

为减小安装误差, 应尽量选取近似标准圆柱体的树干部分固定割胶机器人。对于测量误差, 通过测量模块中的超声波传感器预先扫描树干轮廓, 在切割入刀点测算刀尖与树皮之间的实际距离, 配合进刀深度控制刀具进给量; 当刀尖扎进树皮之后, 实时监测刀具刀尖与刀具原点的距离, 并与刀具刀尖需要到达的目标位置作比较, 控制刀具进给量。

图 3 为割胶机器人测量模块。其中超声波传感器为翰西公司生产的 M18 型, 频率为 200 kHz, 测量精度 0.1 mm, 重复测量精度 0.1%, 用来测量与树皮之间的距离, 其测量范围为 50~1000 mm, 小于 50 mm 为测量盲区, 输出 4~20 mA 的模拟量信号。为使控制系统能检测到因测量距离变化而产生的电流变化, 同时避免盲区检测失效以保证其测量效果, 设置其有效测量范围为 60~120 mm。电容式传感器为翰西公司生产的 PNP 常开型, 用来测量刀具和超声波传感器与刀具原点的距离, 并实时监测刀具进给量, 其工作电压为 DC10~30 V, 可感应距离为 1.5 mm。



1.超声波传感器 2.刀具 3.电容式传感器 4.步进电机  
1.Ultrasonic sensor 2.Cutter 3.Capacitive sensor 4.Stepper motor

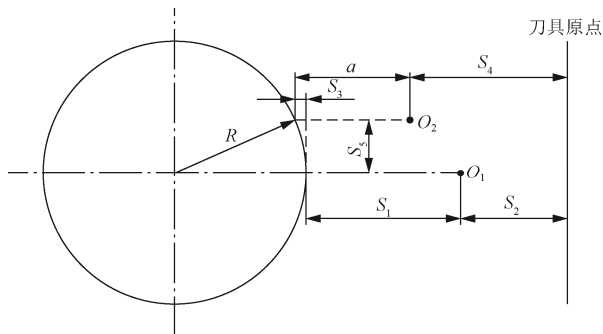
图3 测量模块结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of measuring module structure

测距传感器主要包括超声波传感器和激光传感器 2 种。激光传感器在工作时为单个激光点测距, 在扫描橡胶树围时进行逐点测量, 虽然其测量精度很高, 但因树皮微小凸起或凹陷及树皮上胶液沾附等因素影响, 单个激光点的测量结果偶然性较大。而超声波传感器具有重复测量精度, 且测量范围为扇形区域平均值, 可降低偶然性提高测量准确度。在割胶过程中, 由于流出的胶液与橡胶树干有颜色差异, 要求测距传感器不能受颜色影响, 超声波传感器相对于激光传感器对光线和被测对象的颜色等没有要求, 具有方向性好、测量方便快捷以及可靠性高等优点<sup>[25-26]</sup>, 因此本文选用超声波传感器作为测量模块的测距传感器进行树干轮廓扫描, 测量超声波传感器距树干的距离。

## 2.2 测量误差模型建立

将橡胶树横截面简化为标准圆形, 树干半径为  $R$ , 超声波传感器位于树干径向方向, 割胶方向为顺时针。割胶误差模型如图 4 所示。



注:  $R$  为橡胶树干半径, mm;  $a$  为刀尖至树皮的实际距离, mm;  $S_1$  为超声波传感器前端至树皮的距离, mm;  $S_2$  为超声波传感器前端中心到刀具原点的距离, mm;  $S_3$  为测量误差, mm;  $S_4$  为刀尖到刀具原点的距离, mm;  $S_5$  为超声波传感器前端中心与刀尖的安装的横向距离, mm; 点  $O_1$  为超声波传感器前端中心位置,  $O_2$  为刀尖位置。

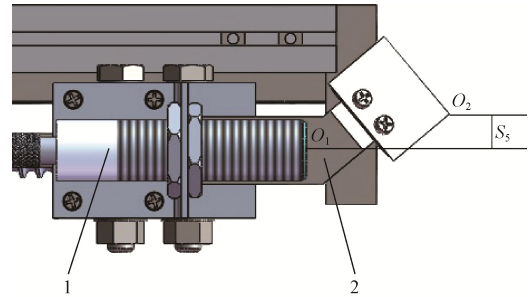
Note:  $R$  is the radius of the rubber tree, mm;  $a$  is the actual distance from the tip of the cutter to the bark, mm;  $S_1$  is the distance from ultrasonic sensor to bark, mm;  $S_2$  is the distance from the center of the front end of the ultrasonic sensor to the origin of the cutter, mm;  $S_3$  is the measurement error, mm;  $S_4$  is the distance from the cutter tip to the origin of the cutter, mm;  $S_5$  is the transverse distance from the center of the front end of the ultrasonic sensor to the cutter tip, mm;  $O_1$  is the position of the center of the front end of the ultrasonic sensor,  $O_2$  is the position of the cutter tip.

图4 测量误差模型

Fig.4 Model of measurement error

图 5 为超声波传感器安装位置与刀具尺寸, 因超声

波传感器安装位置位于树干径向方向, 刀具刀柄与超声波传感器平行, 同时因刀具刀柄具有一定角度, 导致超声波传感器前端中心与刀具刀尖有横向距离  $S_5$ , 又因树干为圆柱形而产生测量误差  $S_3$ 。



注:  $S_5$  为超声波传感器前端中心与刀尖的安装的横向距离, mm;

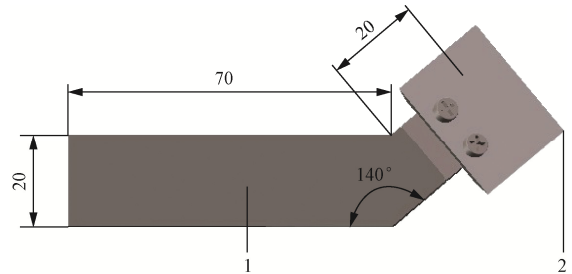
Note:  $S_5$  is the transverse distance from the center of the front end of the ultrasonic sensor to the cutter tip, mm.

1.超声波传感器 2.刀具

1.Ultrasonic sensor 2.Cutter

a. 超声波传感器安装位置

a. Installation location of ultrasonic sensor



1.刀柄 2.刀尖

1.Handle of cutter 2.Tip of cutter

b. 刀具尺寸

b. Size of cutter

图5 超声波传感器安装位置与刀具尺寸

Fig.5 Installation location of ultrasonic sensor and size of cutter

根据超声波传感器测得的距离, 得到刀尖至树皮的实际距离, 通过 PID 控制算法控制刀具进给量完成橡胶切割。由图 4 可知, 刀尖至树皮的实际距离为

$$a = S_1 + S_2 + S_3 - S_4 \quad (1)$$

$$S_3 = R - \sqrt{R^2 - S_5^2} \quad (2)$$

根据 NY/T1088-2006<sup>[27]</sup>, 橡胶树树围达到 500 mm 时才可进行割胶作业。树围为 500 mm 时, 树干半径  $R$  约为 79.6 mm, 本文结构设计中  $S_5 = 9$  mm, 则由式 (2) 计算可得  $S_3 = 0.5$  mm。

当树干树围增大时测量误差  $S_3$  随之增大, 因此测量误差不可忽略。

在割胶作业时, 设定刀尖扎进树皮的深度为  $h$ , 在割胶机割胶作业过程中超声波传感器测量树径时每秒输出 2 个距离值, 故超声波传感器扫描树径完成后形成 ( $S_1^1, S_1^2, S_1^3, \dots, S_1^n$ ) 系列采集数据点。以刀具原点为参考点, 以  $S_1^1 + S_2 + S_3 + h$  作为刀尖移动的第一个目标位置值, 以  $S_4$  作为刀尖当前位置值, 控制系统将刀尖当前位置值与目标位置值作差, 则刀具初始进给量为  $\Delta a = S_1^1 + S_2 + S_3 + h - S_4 = a + h$ , 进刀时间为 1 s。

以  $S_1^2 + S_2 + S_3 + h$  作为刀尖移动的第二个目标位置



值, 以  $S_1^1 + S_2 + S_3 + h$  作为刀尖的当前位置值, 控制系统将刀尖当前位置值与目标位置值作差, 则刀具进给量为  $\Delta a = S_1^2 - S_1^1$ , 在刀具刀尖扎进树皮到达第一个目标位置后, 以  $\Delta a = S_1^n - S_1^{n-1}$  ( $n$  为正整数,  $n \geq 3$ ) 为刀具进给量控制刀尖位置, 直至完成割胶作业。

根据误差模型, 通过超声波传感器测量数据测算刀具刀尖与树皮间的实际距离, 进而实现对刀具进给量的精准控制。

3 割胶试验

为验证割胶机器人割胶作业准确性、实用性与可靠性, 于 2019 年 7 月、12 月在海南儋州市橡胶林进行割胶作业试验, 7 月共切割不同树围的橡胶树 10 棵, 持续时间 7 d; 12 月共切割不同树围的橡胶树 6 棵, 持续时间 5 d。试验装置由割胶机支撑切割装置与控制柜组成, 如图 6 所示。试验橡胶树树围 530~630 mm, 切割位置离地约 1 000 mm。根据人工割胶经验, 在切割螺旋角  $25^\circ \sim 30^\circ$ 、切割深度 4~6 mm, 有效切割时间 20~30 s 条件下进行多组试验, 采用触控屏进行割胶操作以及参数设置。

割胶机采用直流 24 V 锂电池供电, 按照 2 d 割 1 刀, 可为割胶机提供 1 周的稳定电源输入。动力输入采用两相八线的步进电机, 其步距角为  $1.8^\circ$ , 额定电流为 3 A, 工作电压为 10~48 V, 静转矩为 2.1 Nm, 步进电机驱动器为 ZD-2HD542 型全数字两相步进驱动器, 采用差分式接口电路, 可适用差分信号, 内置高速光电耦合器, 采用低速串联接法与电机相连。利用 JY-DZI-5A 型直流电流变送器进行刀具电机工作时的电流采集, 其输入电流为 DC0~5 A, 可输出电流范围为 DC4~20 mA。

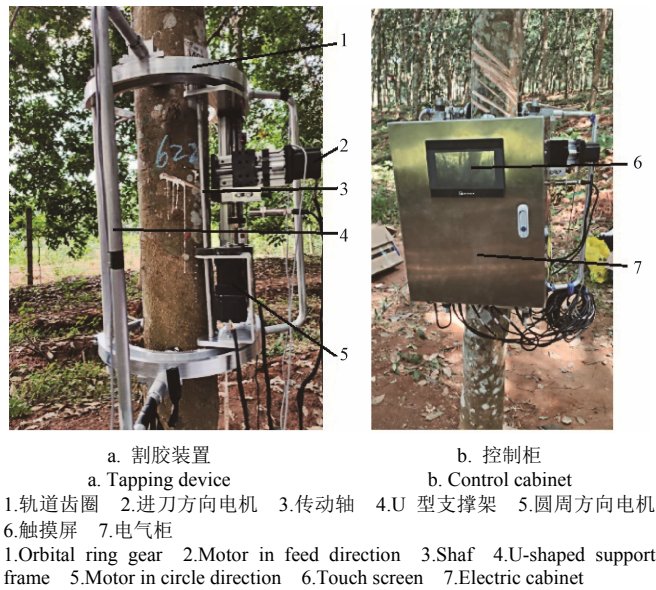


图 6 林间割胶试验装置  
Fig.6 Field tapping test device

橡胶产量受切割时间、切割螺旋角、切割深度以及橡胶树生长状况等多种因素决定, 根据实际割胶作业要

求, 各试验因素设置如表 1 所示。每组试验 3 次重复。

表 1 试验因素水平表

Table 1 Table of test factors level

水平 Levels	切割时间 Cutting time A/s	螺旋角 Helical angle B/( $^\circ$ )	切割深度 Cutting depth C/mm
1	20	25	4.0
2	22	27	4.5
3	24	29	5.0
4	30	30	5.5
5			6.0

从以下 3 个方面对割胶效果进行评价:

1) 切割过程中是否有伤树情况。切割过程中不可损伤橡胶树, 否则容易引起割面霉烂和割线干涸等割面病害, 还会使橡胶树生瘤, 影响橡胶产量。

2) 切割结束后胶液是否外流。胶液外流是指胶乳未沿割线流入胶杯而从割线溢出, 当割线斜度小或割面不均匀时, 胶乳会从割线较平处或割面有毛刺的地方流到胶杯以外。因此从是否出现胶液外流现象可判断割线斜度(切割螺旋角)是否合适。

3) 切割结束后是否完全出胶。出胶情况是评价割胶机器人优劣的重要依据, 当割胶深度太浅时会导致不出胶或不完全出胶, 割胶深度太深则会损伤橡胶树干。

根据影响橡胶产量的主要因素进行试验方案设计, 固定某个影响因素的值, 分析其余 2 个因素间的交互作用对割胶效果的影响。根据现场试验情况, 割深为 4~5 mm 时不出胶或不完全出胶, 5.5 mm 时正常流胶, 6 mm 时出现伤树情况, 故割深其他水平试验没有继续进行。试验方案及结果如表 2 所示。

表 2 试验方案与结果

Table 2 Test scheme and results

序号 No.	因素组合 Factors combination	是否伤树 Whether injury tree	胶液是否外流 Whether glue flowing out	是否完全出胶 Whether glue completely out
1	$A_1B_1C_1$	0	0	0
2	$A_1B_1C_2$	0	0	0
3	$A_1B_1C_3$	0	0	0
4	$A_1B_1C_4$	0	0	1
5	$A_1B_1C_5$	1	0	1
6	$A_2B_1C_4$	0	0	1
7	$A_2B_2C_4$	0	0	1
8	$A_2B_3C_4$	0	1	1
9	$A_2B_4C_4$	0	1	1
10	$A_3B_1C_4$	0	0	1
11	$A_3B_2C_4$	0	0	1
12	$A_3B_3C_4$	0	1	1
13	$A_3B_4C_4$	0	1	1
14	$A_4B_1C_4$	0	0	1
15	$A_4B_2C_4$	0	0	1
16	$A_4B_3C_4$	0	1	1
17	$A_4B_4C_4$	0	1	1

注: 0 表示没有出现相应情况, 1 表示出现相应情况。  
Note: 0 means no corresponding situation, 1 means corresponding situation.

由表 2 可知, 螺旋角为  $25^\circ \sim 30^\circ$  时胶液均沿割线流入胶杯, 未出现胶乳溢出情况; 切割时间对割胶效果无

影响。

以树围 565 mm 橡胶树的割胶试验为例,共割胶 3 次,每次割胶持续时间大致相同,约为 78 s。割胶时切割螺旋角为  $25^\circ$ ,切深为 5.5 mm,切割后可正常顺畅流胶。割胶轨迹及切割树屑如图 7 所示。割胶机器人工作时超声波测量数据与刀具电流如图 8、图 9 所示。



a. 切割轨迹  
a. Cutted trajectory  
1.切割终止点 2.胶乳 3.已割面 4.切割起始点  
1.End point of cutting 2.Latex 3.Cutted surface 4.Starting point of cutting

图 7 割胶效果图

Fig.7 Effects of the tapping diagram

对比图 8、图 9 可知,割胶机器人在 13:36:44 时开始工作,在 13:36:58 时开始对树径进行扫描至 13:37:22 时结束,在 13:37:31 时开始切割树皮,至 13:37:52 时切割结束。割胶机器人从开始切割树皮至切割结束,3 次割胶有效切割时间均为 22 s,而传统人工割胶有效切割时间为 1 min<sup>[28]</sup>,相比于传统人工割胶,割胶效率提高了 63%。

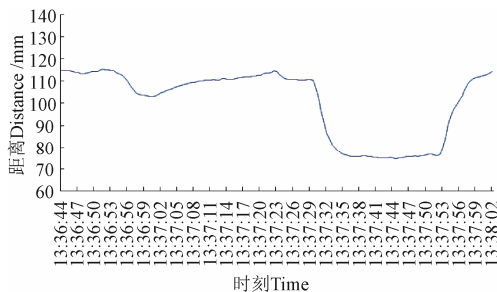


图 8 超声波传感器与树干间距离的变化过程

Fig.8 Changing process of distance between ultrasonic sensor and trunk

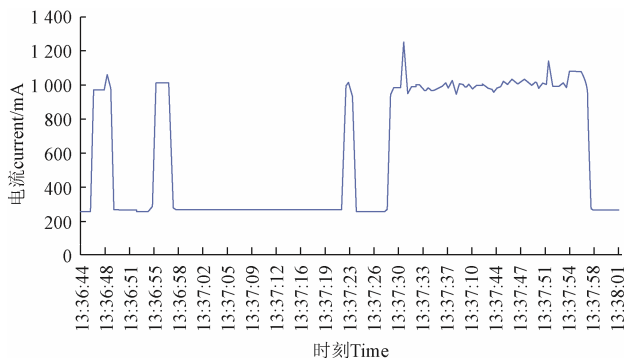


图 9 割刀的电流变化

Fig.9 Variation of cutter current

割胶生产中,在一定割线长度和割胶频率下,合理

的耗皮量是橡胶树稳产高产的关键因素<sup>[29]</sup>。因在切割过程中橡胶树皮会发生塑性变形,切割耗皮量在一定范围内变化。本割胶机器人设计耗皮量为 0.9~1.2 mm,切割结束后用游标卡尺测量的 3 次平均耗皮量为 1.1 mm,满足割胶技术规程要求。

提取刀具切割树皮时电流变化如图 10 所示。

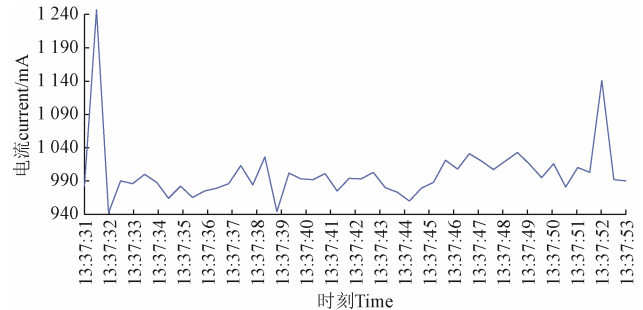


图 10 刀具切割树皮时的电流变化

Fig.10 The change in current as the cutter cutting the bark

由图 10 可知,13:37:31 时刀具电流为 1 247 mA,此时刀尖开始切入树皮,由于刀具进给量较大,为使刀尖快速达到目标位置,所以刀具电流较大;13:37:52 时刀具电流为 1 141 mA,此时刀具快速退回。切割树皮时刀具电流在 940~1 040 mA 变化,电流变化点即为进刀或退刀点。

因割胶机器人使用蓄电池供电,频繁进退刀会增加蓄电池损耗,工作周期内供电量减少。且频繁进退刀会增加刀具与树干之间的冲击力,加剧刀具磨损,增加电机功率损耗,降低割胶效率,同时也会降低机器寿命。为减少频繁进退刀,提高切割效率,延长机器使用寿命,所以控制刀尖扎进树皮的深度在一定范围内进行橡胶切割以减少进退刀次数。

割胶时刀尖扎进树皮的深度须根据橡胶树的树皮结构和有关割胶技术规定确定。天然橡胶树的树皮厚度约为 7 mm,其树皮结构主要包括粗皮、沙皮外层、沙皮内层、黄皮和水囊皮,其中粗皮起保护内部组织的作用;沙皮层因含有大量的石细胞而成为树皮较硬部分,约占树皮总厚度的 70%,沙皮层的乳管大部分被石细胞挤裂,产胶能力低;黄皮层位于沙皮内层内侧,厚度约为 1 mm,胶乳多,石细胞很少或没有,且是乳管分布最密集、排列最整齐、连通性最好和产胶机能最旺盛的皮层,是产胶的主要部位;水囊皮位于黄皮内侧,一般厚度小于 1 mm,有输导功能的韧皮部,含有细嫩乳管和纵向输导营养物质的筛管,切割后流出清液。在割胶操作中,为了提高产胶率,割破黄皮组织且不损伤水囊皮。

根据 NY/T1088-2006,割胶深度是指刀片割去树皮的内切口与形成层的距离 (mm),该距离按照橡胶树的品种和生长年限来确定<sup>[30]</sup>。对于常规割胶,割胶深度要在 1.2~1.8 mm 范围内。

根据橡胶树树皮厚度和对割胶深度的规定,本文设计刀尖切割树皮的深度范围为 5.2~5.8 mm,满足割胶要求。在 5.2~5.8 mm 切割深度范围内切割橡胶时的刀具电



流与 5.5 mm 定值深度切割时的刀具电流对比如图 11 所示, 通过电流对比可知, 在一定深度范围内割胶和定值深度割胶的进退刀次数的不同。在 5.2~5.8 mm 切割深度范围内割胶时, 刀具电流变化次数即进退刀次数由定值深度割胶的 50 次下降到 32 次, 减少 36%, 刀具电流变化幅度最大缩减 4.11%, 可减少蓄电池和电机功率损耗, 提高割胶效率, 延长割胶机器人使用寿命。

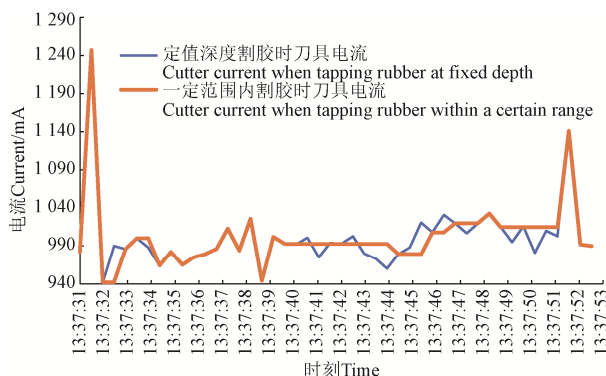


图 11 不同割胶深度的刀具电流对比

Fig.11 Comparison of cutter current at different tapping depths

## 4 结 论

本文设计的固定式割胶机器人在已有研究基础上, 利用超声波测量技术, 将先扫描后切割的割胶控制方式应用于割胶精准控制。使用超声波传感器预先扫描树径后割胶, 提高了测量准确性和切割精度。

建立测量误差控制模型, 利用 PID 控制算法控制刀具进给量, 降低了切割误差。该割胶机器人有效切割时间为 22 s, 相比于传统人工割胶, 割胶效率提高了 63%; 切割螺旋角为  $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ; 割胶耗皮量为 1.1 mm; 该机器人采用在一定深度范围内割胶, 割胶深度范围为 5.2~5.8 mm, 在此切割深度范围内切割橡胶, 刀具进退刀次数减少 36%, 刀具电流变化幅度最大缩减 4.11%。并通过对机器人的试验测试, 验证了固定式割胶机器人的整机结构、误差分析方法和切割控制方式具有准确性、实用性与可靠性。

### 【参 考 文 献】

- [1] 王盛娜. 我国天然橡胶产业发展现状及对策[J]. 乡村科技, 2020(13): 43-44.
- [2] 张华林, 贺军军, 李文秀, 等. 我国胶园林下经济发展现状及对策建议[J]. 南方农业, 2019, 13(21): 61-62.
- [3] Huang Huide, Liu Jing, Huang Haolun. Strategies for natural rubber production and development in China[J]. Asian Agricultural Research, 2017, 9(7): 15-17.
- [4] 罗庆生, 许仕杰, 李凯林. 便携式自动割胶机器人结构与静力学分析[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 with English abstract)
- [5] 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 with English abstract)
- [6] Brian T. Encyclopedia of Applied Plant Sciences[M]. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [7] Zhao Y, Zhou L M, Chen Y Y, et al. MYC genes with differential responses to tapping, mechanical wounding, ethrel and methyl jasmonate in laticifers of rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.)[J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(14): 1649-1658.
- [8] 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 with English abstract)
- [9] 杨文凤, 黄学全, 校现周. 从割胶技术方面解决胶工短缺的探讨[J]. 中国热带农业, 2015(5): 7-10.
- [10] 黄华, 魏博, 张迪, 等. 割胶设备发展现状与趋势[J]. 农业工程, 2018, 8(6): 16-20.
- [11] 吴明, 魏小弟, 校现周. 提高割胶劳动生产率的探讨[J]. 中国热带农业, 2014(3): 18-19.
- [12] 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.
- [13] Group R A. Leading supplier of premium quality rubber and latex[J]. Rubber Asia, 2015, 30(5): 194.
- [14] Sunheem P, Aiyarak P. A microwave transmission instrument for rapid dry rubber content determination in natural rubber latex[J]. MAPAN-Journal of Metrology Society of India, 2016, 31(2): 129-136.
- [15] Zhang Lin, Zhao Zhimin, Ji Yuyu, et al. Determination of dry rubber content in natural rubber latex based on wavelet-domain fluorescence image[J]. Journal of Testing and Evaluation (JOTE), 2013, 41(4): 667-674.
- [16] 吴思敏. 我国林间智能割胶机器人的产生[J]. 世界热带农业信息, 2019(11): 16.
- [17] 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: CN105766551A[P]. 2016-07-20.
- [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: 中国农业学, 2018.  
Wang Xuelei. Research on Motion Control Technology of Rubber Tapping Robot Based on Hybrid Mechanism[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [19] 艾哈迈德 N, 阿布·马利克 K, 马罗夫 M H. 自动割胶机: 201280011835.6[P]. 2012-10-12.
- [20] 吴米. 全自动橡胶割胶机研制与关键技术研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019.  
Wu Mi. Research on the Development and Key Technology of Full-automatic Rubber Tapping Machine[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [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 with English abstract)
- [22] 许振昆, 吴纪营, 张兴明. 一种割胶机: CN210610542U[P]. 2020-05-26.
- [23] 许振昆, 吴纪营, 张兴明. 一种割胶刀: CN211558283U[P]. 2020-09-25.
- [24] 黄宗道. 我国天然橡胶业面临的挑战和发展战略[J]. 中国工程科学, 2001(2): 28-32.
- Huang Zongdao. Challenges and development strategies of China's natural rubber[J]. Strategic Study of CAE, 2001(2): 28-32. (in Chinese with English abstract)
- [25] 周晴. 基于单片机的超声波测距仪系统设计[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(35): 216-217.
- Zhou Qing. Design of ultrasonic ranging instrument based on MCU[J]. Computer Knowledge and Technology, 2018, 14(35): 216-217. (in Chinese with English abstract)
- [26] 时杨, 杨澳妮, 吴若洁, 等. 超声波测距仪的设计与研究[J]. 电声技术, 2020, 44(6): 66-69, 73.
- Shi Yang, Yang Aoni, Wu Ruojie, et al. Design and research of ultrasonic rangefinder[J]. Audio Engineering, 2020, 44(6): 66-69, 73. (in Chinese with English abstract)
- [27] 中华人民共和国. 橡胶树割胶技术规程: NY/T 1088-2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [28] 橡塑中心. 用全自动割胶机打造橡胶行业“农业 4.0”[J]. 橡塑技术与装备, 2015, 41(17): 71.
- [29] 黄志全. 橡胶树超低频六天一刀割制试验研究[J]. 基层农技推广, 2019, 7(8): 23-25.
- [30] 林智勇. 自动割胶机器人刀盘的使用方法: CN108464219B[P]. 2020-11-13.

## Tapping error analysis and precision control of fixed tapping robot

Gao Keke, Sun Jianghong, Gao Feng, Jiao Jian

(Electrical and Mechanical School, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Tapping is the key technical procedure for the extraction of the latex from rubber trees in the processing of natural rubber. However, there are some problems with current fixed rubber-tapping equipment, such as high production cost, high weight of the whole machine, and low tapping precision. In this study, a new fixed tapping robot was designed using advanced polymer materials. The tapping robot was mainly composed of the clamping mechanism, tapping table, combined roller screw pair, and the module of measuring limits. The weight of the main body in a robot was reduced, thereby making it easier to assemble than before. It is conducive to mass processing and production of tapping robots made of polymer materials, due mainly to the processing cost was also reduced. Specifically, the clamping component was utilized to hold on the tree trunk, when the tapping robot was attached to the rubber tree within the rubber cutting cycle. A tapping control system was selected to scan the tree rounds before tapping. In processing, the eccentric load can cause the bending behavior of the rubber trunk between the tapping robot and the tree trunk. A circumferential motor and an axial motor were set to control the trajectory of the cutter. The running speed of the two motors was controlled to move at a certain ratio during the cutting process, where the spiral secant in space was formed from the bottom right to the top left around the rubber tree. An ultrasonic sensor was used to scan the tree rounds, thereby determining the distance between the ultrasonic sensor and rubber trunk. A mathematical model of error predictive control was established to obtain the distance between the tip of the cutter and the bark. A PID control was also selected to control the cutter feed, thereby reducing the cutting error in rubber tapping. The range of cutting depth was determined, according to the structure of rubber bark, and the relevant technical regulations for tapping. The fixed cutting depth of 5.5 mm was expanded to the range of 5.2 to 5.8 mm, to reduce the counting of the cutter moving forward and backward, while reducing the power loss of the motors. Taking the rubber tree with the trunk diameter of 180 mm as a research material, a rubber cutting test was conducted to verify the simulation data, where the cutting helix angle was set as  $25^{\circ}$  -  $30^{\circ}$  in tapping. The results showed that the cutter tip of a tapping robot was guaranteed to reach the target position through the control system. The tapping work was completed by one pass, where the effective cutting time was only 22 s. The tapping efficiency of a fixed tapping robot increased by 63%, compared with traditional manual tapping, where usually multiple passes were required and the effective cutting time was 1 min. The fixed tapping robot achieved a fast and accurate tapping. The bark consumption of cutting rubber was 1.1 mm, indicating suitable for the requirement of bark consumption in the technical specification of tapping. The counting of the cutter moving forward and backward was 36%, lower than that of the original scheme during tapping within the range of 5.2-5.8 mm cutting depth, and the maximum variation range of cutter current was reduced by 4.11%. The rubber tree was not damaged using the fixed tapping robot and tapping control. The fixed tapping robot can be expected to completely replace the manual tapping, and further widely popularize due to its reduced motor power, and improved tapping efficiency.

**Keywords:** rubber; mechanization; harvesting; error analysis; fixed; spiral