doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.025

基于激光仿形的三轴式自动割胶装置设计与试验

张喜瑞[1,2]　陈璿立[1]　张志富[1]　刘俊孝[1,3]　周　洁[4]　董学虎[5]　符少华[2]

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 海南大学信息与通信工程学院, 海口 570228;
3. 海南大学三亚研究院, 三亚 572000; 4. 宁波中创瀚维科技有限公司, 宁波 315000;
5. 海南省农业机械鉴定推广站, 海口 570206)

摘要: 为解决天然橡胶产业中胶工劳动强度高、技术难度大等问题,设计了一种基于激光仿形的三轴式自动割胶装置,通过分析天然橡胶树树围和人工割胶轨迹,确定三轴移动机构结构参数和算法程序,结合 STM32 开发板控制割胶轨迹;设计贴树割胶机构和仿形旋转机构,分析 3 种状态下距离测量值,结合多个舵机完成装置贴树仿形割胶。以割胶角度、割胶深度和橡胶树树围为试验因素,以割胶深度合格率与割面平滑度合格率为试验指标,利用 Design-Expert 软件设计并进行室内割胶试验。试验结果表明,当割胶角度为 24°、割胶深度为 4.96 mm 时,装置对不同橡胶树树围具有优异的割胶效果,其中橡胶树树围为 583 mm 时割胶效果最佳,此时割胶深度合格率为 91.38%,割面平滑度合格率为 89.73%,满足割胶作业要求。

关键词: 天然橡胶; 自动割胶装置; 三轴式; 激光测距

中图分类号: S225.93　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0254-13　　**OSID**:

Design and Test of Three-axis Automatic Rubber Tapping Device Based on Laser Profiling

ZHANG Xirui[1,2]　CHEN Xuanli[1]　ZHANG Zhifu[1]　LIU Junxiao[1,3]　ZHOU Jie[4]　DONG Xuehu[5]　FU Shaohua[2]

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*
2. *School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*
3. *Sanya Research Institute, Hainan University, Sanya* 572000, *China*
4. *Ningbo ZCHW Technology Co., Ltd., Ningbo* 315000, *China*
5. *Hainan Agricultural Machinery Appraisal and Extension Station, Haikou* 570206, *China*)

Abstract: Aiming to solve the problems of high labor intensity and technical difficulty of rubber workers in the natural rubber industry, a three-axis automatic rubber tapping device was designed based on laser profiling. By analyzing the natural rubber tree circumference and manual rubber cutting trajectory within the natural rubber plantation, the structural parameters and algorithm procedures of the three-axis mobile mechanism were determined, and the tapping trajectory of the device was controlled by STM32 development board program. Pasting rubber tapping mechanism and profiling rotary mechanism were designed, and the module distance measurement values under three different tapping states were analyzed. The tree-sticking profiling tapping was completed by the rotation of the servos on the device. Taking rubber tapping angle, rubber tapping depth and the natural rubber tree circumference as test factors, and the qualified rate of rubber tapping depth and qualified rate of rubber tapping surface uniformity as test indexes, the indoor rubber tapping test was designed and carried out by Design-Expert software. the experimental results indicated that when the rubber tapping angle was 24 degrees and the tapping depth was 4.96 mm, the device had excellent tapping effect on different rubber tree circumference. Among them, the rubber tapping effect was the best when the natural rubber tree

收稿日期: 2024-08-28　修回日期: 2024-09-21

基金项目: 海南省科技人才创新项目(KJRC2023C04)、国家自然科学基金区域联合基金项目(U23A20176)、海南省院士创新平台项目(YSPTZX202109)、国家天然橡胶产业技术体系项目(CARS-33-JX2)、海南省自然科学基金项目(523RC440)、三亚市科技创新专项项目(2022KJCX94)和海南省高等学校科学研究项目(Hnky2022-9)

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: zhangxr@hainanu.edu.cn

通信作者: 符少华(1988—),女,高级工程师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: 22120854000009@hainanu.edu.cn

circumference was 583 mm, with the qualified rate of rubber tapping depth of 91.38% and the qualified rate of rubber tapping surface uniformity of 89.73%, meeting the technical requirements of rubber tapping.

Key words: natural rubber; automatic rubber tapping device; three-axis type; laser ranging

0　引言

天然橡胶具有良好的耐磨性、抗冲击性和回弹性等,在国防军工和航空航天等领域有着无法替代的地位,割胶是指通过割胶工具割破橡胶树树皮,获得天然乳胶的过程,主要通过各种刀具半螺旋环切橡胶树实现[1-4]。为提高胶乳产量,天然橡胶主要通过胶工在排胶温度适宜的凌晨借助刀具手动割胶获取[5-6],导致胶工劳动强度大,生产效率低,人工成本占天然橡胶全周期生产成本的 70% 以上[7]。由于天然橡胶价格日益萎靡、胶园弃割弃管和胶工短缺现象愈发加剧,我国天然橡胶产业健康发展已经受到严重威胁[8-10]。因此,通过农机农艺融合,发展机械化、自动化割胶是保证天然橡胶质量与产量、解决“胶工荒”产业困境、促进天然橡胶产业发展的有效手段[11-14]。

目前,割胶装备主要分为手动割胶刀、电动辅助割胶刀和自动割胶机。手动割胶刀作为使用最广的割胶工具,技术人员长期在耐用性、控制精度以及人体工学等方面进行优化改进[15-17],但仍依赖胶工专业操作,割胶技术难度并未有效降低。电动辅助割胶刀是一种依靠电机提供动力辅助割胶的手持式工具,通过机械结构限定割胶深度与厚度,一定程度上降低了对胶工的技术性要求[18-20],但仍需胶工手持割胶,并未解决产业面临“胶工荒”的根本问题。

自动割胶机是指一种无需人工参与,依靠多种机械设备联合,自主完成割胶过程的机械装置,其结构复杂,智能化程度高。随着物联网、机器人等现代信息技术在农业领域的应用,农业现代化技术不断蓬勃发展,越来越多的橡胶种植国开始重视并研发自动化智能化割胶机[21-26]。目前国内外常见的自动割胶机根据其作业方式可分为固定式和移动式。固定式割胶机主要由悬挂机构与割胶装置组成,多通过机械接触式仿形,一对一安装在每棵橡胶树上,依靠基站进行多机协同割胶[27-30],建设与维护成本较高,在海南、广东等地进行试点试验。移动式割胶机是指一种能够林间自主导航定位并完成割胶作业的智能化装备,割胶装置结构较简单,借助外部传感器和多自由度设备识别待割区域和行走割胶轨迹[30-33],仿形能力与控制精度较低,轨迹规划难度大,制造成本高昂,目前移动式割胶机仍不够成熟,各方面都存在较大的发展空间。

为优化自动割胶机对树干表面的仿形能力,本文结合割胶技术要求,设计一种基于激光仿形的三轴式自动割胶装置,确定其主要结构参数和控制程序,探究测距模块在割胶过程中实时仿形和控深预紧的应用,通过三因素三水平正交试验,明确装置最佳割胶参数,以期提高自动割胶机对割胶轨迹与割胶深度的控制精度和作业稳定性,降低整机生产维护成本,为割胶机器的研发提供参考。

1　整机设计与工作原理

1.1　整机设计

三轴式自动割胶机结构如图 1 所示,主要由三轴移动机构、割胶装置、识别相机、控制系统和移动式底盘等部分组成。三轴移动机构由 *XYZ* 三轴滑轨搭建组成,用于带动割胶装置和识别相机;割胶装置由仿形旋转机构和贴树割胶机构组成,通过两组测距模块实现割胶刀头精准贴树与仿形割胶;控制系统采用 STM32 控制板和多款电机驱动模块搭建。

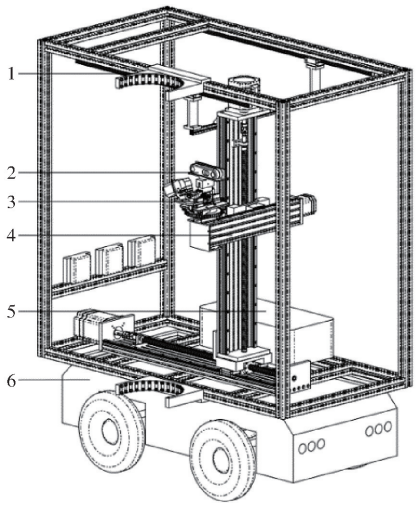

图 1　移动式自动割胶机结构简图

Fig. 1　Mobile automatic rubber tapping device

1. 夹持机构　2. 识别相机　3. 割胶装置　4. 三轴移动机构　5. 控制系统　6. 移动式底盘

1.2　工作原理

三轴式自动割胶装置通过夹持机构与橡胶树紧固,三轴移动机构带动割胶装置进行贴树割胶,其具体工作原理为:在蓝牙模块收到开始指令后,装置开始测量橡胶树树围,三轴移动机构在起割点处维持 *Z* 轴高度不变,分别在 *X* 方向始末两端

测量与树干距离的最小值,计算树围并选定对应割胶程序。

三轴移动机构回到起割点并进入割胶作业阶段,通过对比多个测距模块的测量值,仿形旋转机构保持刀头正对树干,贴树割胶机构仿形块紧贴树干,并通过压缩弹簧为刀头提供稳定的割胶预紧力。

割胶装置在三轴移动机构的带动下沿割胶轨迹行走,测距模块实时反馈测量数据,通过割胶装置上的相应机构,使割胶刀头稳定贴树并围绕树干完成空间螺旋切割。三轴移动机构完成割胶轨迹后,带动割胶装置远离树干并沿对应退刀轨迹,重新回到起割点下方。

2 关键机构设计

2.1 三轴移动机构

2.1.1 螺旋割胶轨迹

合理规划装置割胶轨迹对割胶作业质量和连续性有重要影响,结合海南胶工日常割胶习惯,采取广泛使用的阳刀割胶法,以切割半树周螺旋割线作为装置割胶轨迹,如图 2 所示,虚线和实心点分别表示割胶轨迹和起割点,并按照实心点所在横切面作为此橡胶树树围,因割线倾斜角较小,割线上树干半径变化可以忽略。



图 2 橡胶树割胶轨迹

Fig. 2 Rubber tree tapping trajectory

树龄 6 ~ 7 年且正常生长的橡胶树树围能够达 500 mm,此后可进行 30 ~ 40 年的日常割胶作业,较长的经济寿命导致可割橡胶树树围跨度较大。为实现割胶装置面对不同橡胶树树围割胶作业,考察海南省儋州市橡胶园中橡胶树树围(图 3),选定割胶作业有效树围为 450 ~ 720 mm,根据橡胶树树围 C 与半径 r_d 关系式

$$r_d = \frac{C}{2\pi} \tag{1}$$

可知本装置割胶作业有效半径为 71 ~ 115 mm,即割胶作业最大半径 r_{max} 为 115 mm。

为简化计算,将橡胶树树干视为标准圆柱体,忽略其表面凸起,由标准圆柱体表面空间半螺线表示割胶轨迹。如图 4 所示,割胶装置通过 XYZ 三轴移动机构带动,实现空间三自由度位移,因此可以将三轴移动机构行走的割胶轨迹分为水平面上标准半圆位移和竖直方向上下位移。以半圆圆心为坐标原点 O,XOY 平面为水平面,建立空间直角坐标系,则割胶轨迹方程为

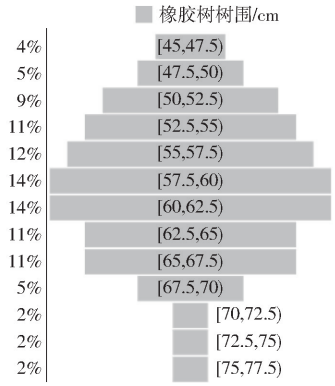

图 3 橡胶树树围漏斗图

Fig. 3 Funnel diagram of rubber tree circumference

$$\begin{cases} x^2(t) + y^2(t) = r_d^2 \\ y(t) \geqslant 0 \\ z(t) = v_Z t \end{cases} \tag{2}$$

式中 t——三轴移动机构运行时间,s

v_Z——Z 轴滑台移动速度,mm/s

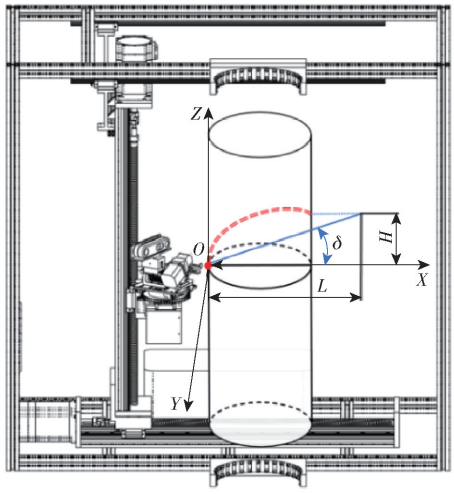

图 4 理论割胶轨迹示意图

Fig. 4 Schematic of theoretical tapping trajectory

在三轴移动机构完成一个半螺旋割胶轨迹时间 T 内,将其所行走的路径展开成为 XOZ 平面上的一条直线,可知轨迹与周期之间关系为

$$\begin{cases} L_r = \pi r_d = v_R T \\ H_r = v_Z T \\ \dfrac{H_r}{L_r} = \tan\delta \end{cases} \tag{3}$$

式中 L_r——三轴移动机构所走半圆弧长,mm

v_R——刀头匀速圆周运动线速度，mm/s

H_r——割胶轨迹始末两端高度差，mm

δ——割胶轨迹升角，(°)

2.1.2　整体结构设计

三轴移动机构结构示意图如图 5 所示，*X* 轴滑轨水平固定在外部框架底面上方，*Z* 轴滑轨竖直安装在顶端辅助滑轨和 *X* 轴滑轨之间，*YZ* 两轴滑轨滑块相对安装，通过 *XYZ* 三轴滑块自由移动，实现 *Y* 轴滑轨末端割胶装置完成割胶作业。

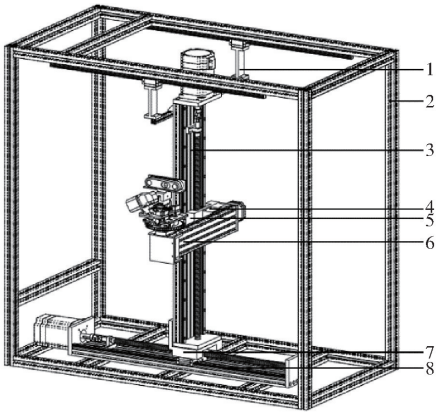

图 5　三轴移动机构示意图

Fig. 5　Structure diagram of three-axis mobile mechanism

1. 辅助滑轨　2. 外部框架　3. *Z* 轴滑轨　4. *Y* 轴滑块　5. *Z* 轴滑块　6. *Y* 轴滑轨　7. *X* 轴滑块　8. *X* 轴滑轨

割面指割胶完成后刀头对树干造成的创伤面，割面质量决定天然橡胶产量和质量。为了尽可能满足不同高度割胶作业，设计装置能够完成新割胶轨迹离地高度为 1 000 ~ 1 500 mm，则装置可割原生皮长度最大值 ΔH_{max} 为 500 mm，满足大部分橡胶树割面高度需求。

外部框架长度会限制三轴移动机构最大行程，从而影响装置最大割胶高度和割胶直径，通过加装 PVC 防水布，避免胶林下雨影响设备，因此除开 *Y* 轴滑轨一侧需要伸出的部分，外部框架需要保证完全包围三轴移动机构，并增加 20% 的设计余量，则外部框架长度应满足

$$\begin{cases} 1.2S_z \leqslant L_c \\ S_x \tan\delta_{max} \leqslant S_z \\ r_{max} + R_{gmax} \leqslant \dfrac{S_z - \Delta H_{max}}{2\tan\delta_{max}} \end{cases} \tag{4}$$

式中　S_z——*Z* 轴滑轨有效行程，mm

L_c——外部框架竖直杆件长度，mm

S_x——*X* 轴滑轨有效行程，mm

R_{gmax}——割胶装置旋转圆心与刀头末端最长距离，mm

δ_{max}——半螺旋割胶轨迹升角最大值，(°)

对割胶作业过程中装置最大割胶树围进行分析，俯视图如图 6 所示，三轴移动机构带动割胶装置依次经过左侧最远端点 *A*、中心最近处点 *B* 和右侧最远端点 *C* 完成半圆弧轨迹线。

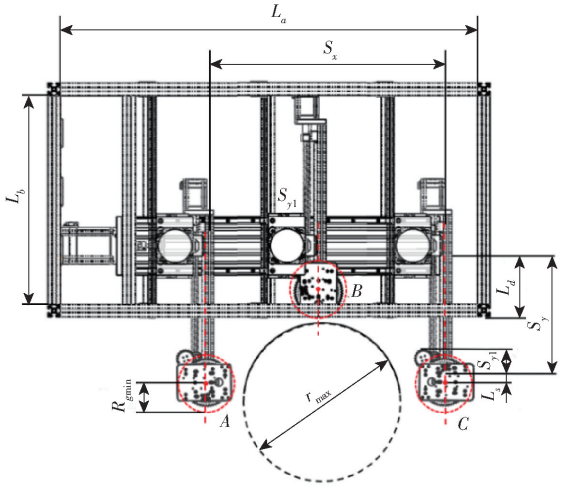

图 6　机构不同位置割胶作业俯视图

Fig. 6　Top view of mechanism tapping at different positions

三轴移动机构在 *X* 轴方向上能够移动的最远距离为 *AC* 两点之间的距离，此方向装置割胶作业满足

$$\begin{cases} 1.2S_x \leqslant L_a \\ 2(r_{max} + R_{gmin}) \leqslant S_x \end{cases} \tag{5}$$

式中　L_a——外部框架水平长杆件长度，mm

R_{gmin}——割胶装置旋转圆心与刀头末端最短距离，mm

三轴移动机构在 *Y* 轴方向上能够移动的最远距离为点 *B* 到 *AC* 两点所在直线的距离，此方向装置割胶作业满足

$$\begin{cases} 1.2S_y \leqslant L_b \\ r_{max} \leqslant S_y - S_{y1} - L_d + L_s + R_{gmin} \end{cases} \tag{6}$$

式中　S_y——*Y* 轴滑轨有效行程，mm

L_b——外部框架中水平短杆件长度，mm

S_{y1}——*Y* 轴滑轨末端到割胶装置最外侧水平距离，mm

L_d——框架外侧与 *Y* 轴滑块间距离，mm

L_s——*Y* 轴滑轨末端到割胶装置旋转圆心水平距离，mm

参考割胶技术规程[34]和海南橡胶树生长特性，采用阳刀割胶时，半螺旋割胶轨迹升角为 25° ~ 30°，为保证装置合理性，选取半螺旋割胶轨迹升角最大值 δ_{max} 为 35°。

采用 3030 铝型材作为外部框架的搭建材料，将相关数据代入式(4) ~ (6)，选定 *Z* 轴滑轨有效行程 S_z 为 700 mm。在割胶装置设计中，割胶装置旋转圆心即是仿形旋转机构大齿轮圆心，且位于 *Y* 轴滑轨末端，即 L_s = 0 mm。预估割胶装置旋转圆心与刀头

末端距离 R_g 为 88 ~ 111 mm，Y 轴滑轨末端到割胶装置最外侧水平距离 S_{y1} 为 75 ~ 85 mm，则三轴移动机构和外部框架结构参数如表 1 所示。

表 1 三轴移动机构和外部框架结构参数

Tab. 1 Structure parameters of three-axis mobile mechanism and external frame mm

参数	S_x	S_y	S_z	L_a	L_b	L_c	L_d
数值	600	700	400	860	560	960	150

2.1.3 三轴移动轨迹设计

三轴移动机构工作示意如图 7 所示，结合式(2)可知，XY 两轴滑块移动速度可表示为

$$\begin{cases} v_X = v_R \sin\theta_R \\ v_Y = v_R \cos\theta_R \end{cases} \tag{7}$$

式中 v_X——X 轴滑块移动速度，mm/s

v_Y——Y 轴滑块移动速度，mm/s

θ_R——割胶刀头所走圆弧段对应角度，(°)

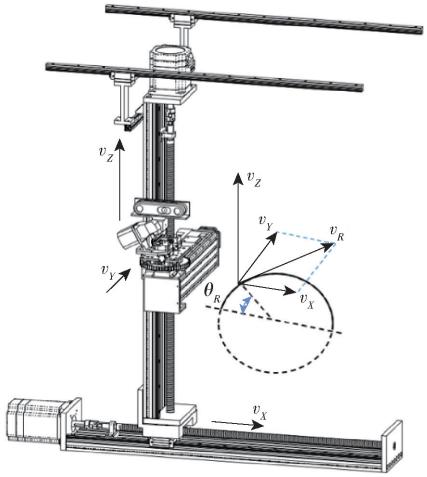

图 7 三轴移动机构工作示意图

Fig. 7 Operating schematic of three-axis mobile mechanism

通过 XYZ 三轴的步进电机驱动丝杠旋转，滑轨上滑块向指定方向移动，则滑块线速度和时间 Δt 内步进电机对应角速度为

$$\begin{cases} v = \dfrac{\omega p}{2\pi} \\ \omega = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\theta_M}{\Delta t} \end{cases} \tag{8}$$

式中 ω——步进电机转动角速度，rad/s

p——滑轨丝杠导程，mm

θ_M——步进电机旋转角，(°)

在时间 Δt 内，步进电机带动丝杠旋转指定角度 θ_M，则步进电机所需输入脉冲数为

$$N = \frac{\theta_M}{\theta_s} n = F\Delta t \tag{9}$$

式中 N——步进电机转动指定角度所需的脉冲数

n——步进电机驱动器细分数

θ_s——步进电机步距角，(°)

F——步进电机内部输入频率，Hz

选用程序中的特定输出模式，通过加工程序内固定输出的 PWM 波频率，实现在同一个定时器通道中输出 3 条不同的 PWM 波频率，从而控制 3 个步进电机旋转速度，其中每个步进电机输入频率为

$$\begin{cases} F = \dfrac{F_{PWM}}{2\alpha_{CCR}} \\ 0 < \alpha_{CCR} < \alpha_{ARR} \end{cases} \tag{10}$$

式中 F_{PWM}——定时器通道输出 PWM 波频率，Hz

α_{ARR}——定时器自动重载值

α_{CCR}——捕获、比较寄存值

根据式(2)、(3)、(7) ~ (10)可知三轴移动机构滑块移动速度为

$$v = \frac{F_{PWM}\theta_s p}{4\pi n \alpha_{CCR}} \frac{\mathrm{d}\theta_M}{\mathrm{d}t} \tag{11}$$

选取 STM32F103 开发板的 TIME2 定时器通道，取 F_{PWM} 为 72 MHz，为保证 α_{CCR} 值可设置的范围最大，选取 α_{ARR} 最大值，即 $\alpha_{ARR} = 2^{16} - 1 = 65\,535$；选取 57BYGH112 型两相四线步进电机作为三轴移动机构的动力输入，额定电流 3.8 A 直流电流，步距角 1.8°，即其弧度为 π/100 rad；采用双线螺纹丝杠，螺距长度为 5 mm，则导程为 10 mm；选取 DM8640H 型驱动模块，通过细分驱动步进电机的方式将 XYZ 三轴步进电机细分数分别设为 20、20 和 40，即每 4 000、4 000、8 000 个脉冲使 XYZ 三轴步进电机转动一圈，确保割胶作业机构移动的准确性和稳定性。将上述数据代入式(11)可得 X、Y、Z 三轴滑块移动速度与程序捕获、比较寄存值关系为

$$\begin{cases} v_X = \dfrac{9.0 \times 10^4}{\alpha_{CCRX}} \\ v_Y = \dfrac{9.0 \times 10^4}{\alpha_{CCRY}} \\ v_Z = \dfrac{4.5 \times 10^4}{\alpha_{CCRZ}} \end{cases} \tag{12}$$

装置割胶作业时，XY 两轴滑块在 XOY 平面上进行匀速圆周运动，即 v_X 和 v_Y 随时间做余弦和正弦变化，令 α_{CCRX} 和 α_{CCRY} 最小值相等，则在一个周期时间 T 内 α_{CCRX} 和 α_{CCRY} 随时间变化关系式为

$$\begin{cases} \alpha_{CCRX} = \dfrac{\alpha_{CCRO}}{\sin\left(\dfrac{\pi}{T}t\right)} \\ \alpha_{CCRY} = \dfrac{\alpha_{CCR}}{\cos\left(\dfrac{\pi}{T}t\right)} \end{cases} \tag{13}$$

式中　α_{CCRO}——程序内 α_{CCRX} 和 α_{CCRY} 的最小值

为保证程序数据正常输入，避免滑块速度过快导致运动不稳定，规定 α_{CCRX} 和 α_{CCRY} 的最大值不超过 60 000，根据式(11)～(13)得到 *XOY* 平面上机构匀速圆周运动线速度与时间关系式为

$$\begin{cases} v_X = \dfrac{9.0\times10^4}{\alpha_{CCRO}}\sin\left(\dfrac{\pi}{T}t\right) \\ v_Y = \dfrac{9.0\times10^4}{\alpha_{CCRO}}\cos\left(\dfrac{\pi}{T}t\right) \\ v_R = \dfrac{9.0\times10^4}{\alpha_{CCRO}} \end{cases} \tag{14}$$

由式(14)可知半螺旋割胶轨迹的升角与程序捕获、比较寄存值之间关系为

$$\tan\delta = \frac{\alpha_{CCRX}\alpha_{CCRY}}{2\alpha_{CCRZ}\sqrt{\alpha_{CCRX}^2+\alpha_{CCRY}^2}} = \frac{\alpha_{CCRO}}{2\alpha_{CCRZ}} \tag{15}$$

阳刀割胶轨迹升角一般为 25°～30°，确定其中间值 28°并上下间隔 4°再次选取，以验证装置设计合理性，选取割胶角 24°、28°和 32°进行后续试验。对树围 $C_{\max}$ 为 720 mm 的橡胶树进行割胶时，参考人工割胶时间，为保障割胶过程精确平稳，设计机构完成半螺旋割胶轨迹时间 T 为 54 s。

选取割胶装置旋转圆心与割胶刀头末端之间的距离 R_{go} 为 75 mm，则此时三轴移动机构实际行走圆周半径 $R_{o\max}$ 为 190 mm，水平面匀速圆周运动线速度 v_R 为 11.05 mm/s，则设定 α_{CCRO} 为 8 145，此速度下通过选取不同的 α_{CCRZ} 来改变半螺旋割胶轨迹升角 δ，关系如表 2 所示。

表 2　割胶轨迹升角参数

Tab. 2　Lifting angle parameter of tapping track

寄存值	数值	参数	数值	参数	数值
α_{CCR}	8 145	$v_R/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	11.05		
α_{CCRZ}	9 152	$v_Z/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	4.92	$\delta_1/(°)$	24
α_{CCRZ}	7 655	$v_Z/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	5.88	$\delta_2/(°)$	28
α_{CCRZ}	6 516	$v_Z/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	6.91	$\delta_3/(°)$	32

由表 2 可知，此时捕获、比较寄存值为最小值，$\alpha_{CCR\min}$ 为 8 145，针对不同橡胶树树围，保持割胶作业时间不变，得到程序应设置的捕获、比较寄存值 α_{CCRS} 与此时匀速圆周运动线速度 v_R、待割橡胶树半径 r_d 关系式为

$$\frac{\alpha_{CCR\min}}{\alpha_{CCRS}} = \frac{v_R}{v_{\max}} = \frac{r_d+R_{go}}{r_{\max}+R_{go}} \tag{16}$$

由式(16)可知，通过改变 α_{CCRO} 和 α_{CCRZ}，装置可以在不同割胶轨迹升角 δ 下完成不同橡胶树树围割胶作业，因此在装置能够进行割胶作业树围 450～720 mm 内，机构在 *XOY* 平面匀速圆周运动线速度 v_R 为 8.49～11.05 mm/s，α_{CCRS} 为 8 145～10 600。

2.2　割胶装置

2.2.1　贴树割胶机构

贴树割胶机构结构示意图如图 8 所示。由图 8 可知，前滑块上通过割胶刀支架固定有割胶刀电机和割胶刀头，并与后滑块通过弹簧柔性连接，舵机 1 通过齿轮齿条传动控制滑块沿滑轨运动，根据测距模块 M、B 反馈的数据保持割胶刀头稳定贴树。

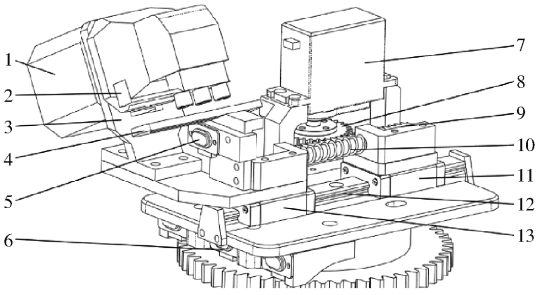

图 8　贴树割胶机构结构示意图

Fig. 8　Structure diagram of pasting rubber tapping mechanism

1. 割胶刀电机　2. 割胶刀头　3. 割胶刀支架　4. 仿形块　5. 测距模块 M　6. 测距模块 B　7. 舵机 1　8. 贴树齿轮　9. 齿条　10. 弹簧　11. 后滑块　12. 滑轨　13. 前滑块

在进刀作业时，贴树割胶机构后滑块向靠近橡胶树方向运动，割胶刀头与仿形块紧贴树皮，弹簧在树皮反作用力下被压缩并提供预紧力，通过测距模块 M、B 反馈并实时调控预紧力。这种柔性连接方式能够使仿形块紧贴树干表面，为割胶刀头提供合适的预紧力以稳定割胶深度，避免因刚性连接导致割破橡胶树水囊皮而造成的伤树现象。

贴树割胶机构是一种带有测距反馈功能的旋转型间接推动式控制机构，具有结构紧凑、工作平稳、准确性和可靠性高等优点，相比于直线推动式的控制机构，更适合用于控制短距离进退割胶刀头。在进刀退刀过程中，滑块滑轨之间为点接触的滑动摩擦，且为低速运动，摩擦力可忽略不计，以减小齿轮齿条尺寸为原则，选取模数 m_1 为 1 mm，齿轮齿条参数如表 3 所示。

表 3　齿轮齿条参数

Tab. 3　Parameters of gear and rack

参数	齿数 Z	分度圆直径 d/mm	齿宽 H/mm	压力角 $\beta/(°)$	齿厚 S_Z/mm
齿轮	31	31		20	8
齿条	22		76	20	8

机构割胶位置示意图如图 9 所示，设定前滑块在滑轨上有效位移最大值为 23 mm，滑块之间距离为 12 mm，以此为弹簧自由长度，即 L_K 为 12 mm。割胶开始前，通过调节仿形块与割胶刀头之间的距离，选定机构割胶深度 L_g，并确定测距模块 M 到

仿形块前端之间的距离 S_F，使舵机 1 带动后滑块前移，测距模块 M 测量值 $S_{MM'}=S_F$；舵机 1 继续转动一定角度，后滑块前移距离 ΔL_K，记录测距模块 B 测量值 $S_{BB'_0}$，此时割胶刀头受到弹簧弹力计算式为

$$F_K=k\Delta L_K \tag{17}$$

式中 F_K——弹簧弹力，N

k——弹簧弹性系数，N/m

ΔL_K——弹簧压缩形变长度，mm

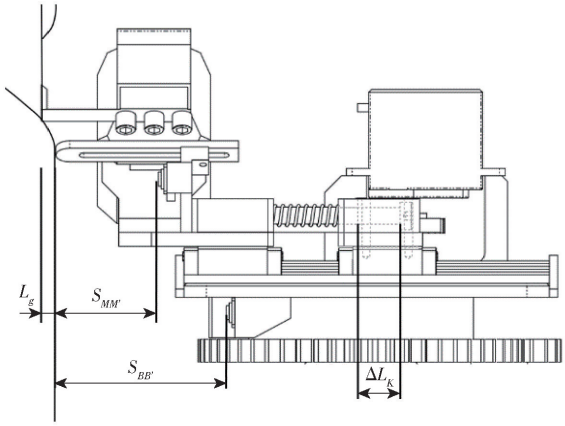

图 9 机构割胶位置示意图

Fig. 9 Installation schematic of mechanism tapping

由式(17)可知，割胶作业过程中，当树干表面无明显变化时，弹簧压缩形变长度 ΔL_K 保持不变，则预紧力 F_K 保持不变。当树干表面凹凸起伏较大时，弹簧会相对松弛或压缩，预紧力 F_K 会缩小或增大，在一定范围内刀头紧贴树皮，测量值 $S_{MM'}$ 不变，但测量值 $S_{BB'}$ 会缩小或增大，通过控制舵机 1，使测量值 $S_{BB'}=S_{BB'_0}$，则弹簧压缩量保持为 ΔL_K，在一定范围内保持预紧力稳定，使机构割胶深度稳定。选用厚度 1 mm、宽度 10 mm、长度 40 mm 的压缩弹簧，弹性系数为 30 N/cm，控制舵机 1 压缩弹簧距离 ΔL_K 为 10 mm，并通过舵机 1 旋转使预紧力 F_K 为 25 ~ 35 N，满足割胶作业要求。

为保证测距模块 B 测量值 $S_{BB'}$ 与割胶区域树围半径的变化相同，应尽可能减小测距模块 B 与仿形块间的竖直距离，选定割胶倾角为 28°时二者距离为 55 mm。割胶刀支架与仿形块位置示意图如图 10 所示，为保证装置控深的精准度，需要确保测距模块 M、割胶刀头、机构旋转中心与测距模块 B 在同一直线 l_1 上。由于三轴移动机构可以完成不同升角的割胶轨迹，以割胶作业中割胶刀头阻力最小为原则，为不同割胶轨迹升角设计不同的割胶刀支架。在割胶刀电机与割胶刀头的相对位置不变的情况下，通过改变割胶刀支架长度保证割胶刀头始终在直线 l_1 上，则割胶刀支架长度关系式为

$$\begin{cases} S_0\cos(\alpha_1-\alpha_0)=S_{\alpha_1}\cos\alpha_1+L_0 \\ \tan\alpha_1=\dfrac{S_0\sin(\alpha_1-\alpha_0)+H_{\alpha_1}+H_0}{S_0\cos(\alpha_1-\alpha_0)-L_0} \end{cases} \tag{18}$$

式中 S_0——刀头与割胶刀支架间固定距离，mm

L_0——割胶刀支架底端到直线 l_1 的距离，mm

α_0——刀头、割胶刀支架顶端与底端三点所形成的夹角，(°)

α_1——割胶刀支架与水平面之间夹角，(°)

S_{α_1}——割胶刀支架长度，mm

H_0——刀头与仿形块间的距离，mm

H_{α_1}——仿形块与支架底端间距离，mm

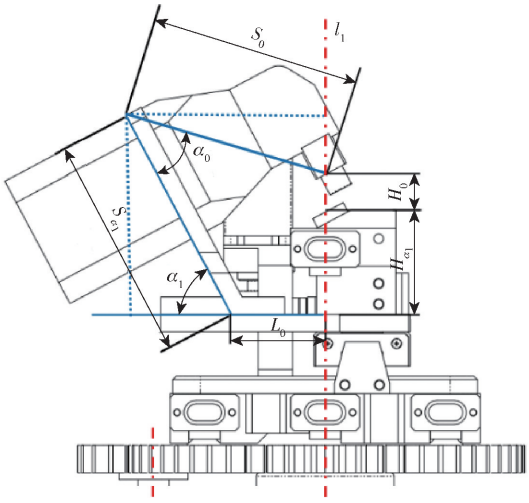

图 10 割胶刀支架与仿形块位置示意图

Fig. 10 Installation schematic of tapping knife bracket and profiling block

根据割胶刀电机与割胶刀支架的自身结构特点，安装割胶刀头的刀刃垂直于割胶刀支架斜面，则 α_1 与割胶轨迹升角互为余数。以提高机构深度控制的精确度为原则，尽可能缩小测距模块 M 与割胶刀头间距离，令 $H_0=9$ mm，$S_0=65$ mm，$L_0=35.2$ mm，$\alpha_0=49.5°$为定值，在 3 种轨迹升角情况下，可知支架角度为 58°、62°、66°，由式(18)可知割胶刀支架与仿形块结构参数如表 4 所示。

表 4 割胶刀支架与仿形块参数

Tab. 4 Parameters of tapping knife bracket and profiling block

序号	轨迹升角/(°)	支架角度/(°)	支架长度/mm	仿形块高度/mm
1	24	66	67	34
2	28	62	60	30
3	32	58	55	28

2.2.2 仿形旋转机构

仿形旋转机构结构示意图如图 11 所示，机构固定底座安装在在 Y 轴滑轨末端，上方设有外啮合的大齿轮和小齿轮，通过舵机 2 工作，使其输出端的小

齿轮带动大齿轮自由旋转。测距模块 A、B、C 能够跟随大齿轮同步转动，测量并实时反馈与树干间的距离，保障割胶刀头精准稳定对准树干。

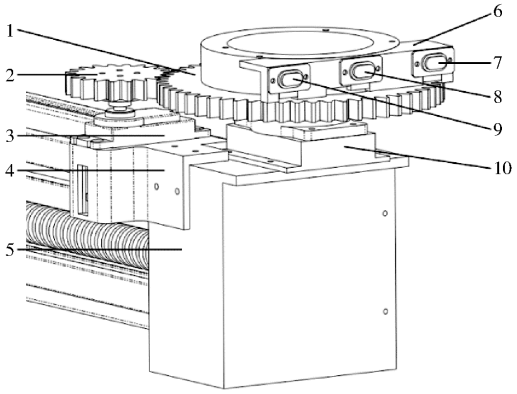

图 11　仿形旋转机构结构示意图

Fig. 11　Structure diagram of profiling rotary mechanism

1. 大齿轮　2. 小齿轮　3. 舵机 2　4. 舵机安装架　5. 机构固定底座　6. 模块固定板　7. 测距模块 C　8. 测距模块 B　9. 测距模块 A　10. 大齿轮底座

测距模块 A、B、C 选用激光测距功能模块，相较于超声波等测距方式，具有精度高、回传速率快、不受环境影响等特点，故本文不讨论模块回传时间。相较于其他割胶装置常采用的捆绑齿形同步带或割胶刀头旋转速率恒定的方式，仿形旋转机构可以实时监测待割区域的树围变化，有效避免树干起伏较大导致的割深不稳定，实现装置精准仿形旋转。

监测树干待割区域时，仿形旋转机构存在 3 种状态，分别为正常状态（图 12a）、滞后状态（图 12b）和超前状态（图 12c），其中曲线 N 为割胶轨迹在水平面上的投影，树干中心处设为点 O，仿形旋转机构中心处设为点 O'，测距模块 A、B、C 在树干表面测量点分别为点 A_1'、B_1'、C_1'。

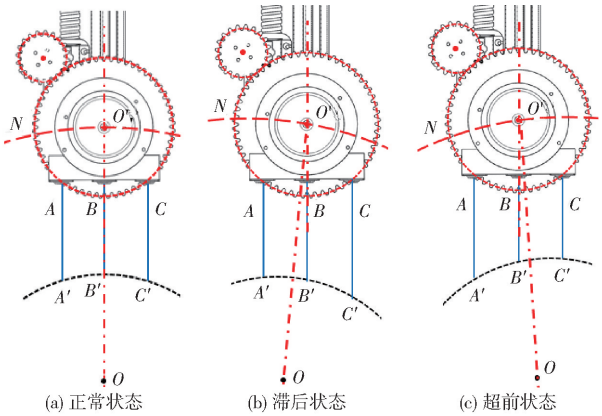

图 12　仿形旋转机构 3 种测距状态

Fig. 12　Three ranging states of profiling rotary mechanism

装置割胶作业时，仿形旋转机构常处于正常状态，如图 12a 所示，测距模块 B 正对点 O，O、B、B'、O' 4 点共线，测距模块 A、C 关于直线 OO' 对称，此时测距模块 A、C 所测距离相等且大于测距模块 B 所测距离。

当割胶装置正常工作并在曲线 N 上行走顺时针轨迹时，仿形旋转机构会出现滞后状态，如图 12b 所示，相较于正常状态，此时测距模块 B、C 所测距离增大，测距模块 A 所测距离减小；超前状态与滞后状态相似，如图 12c 所示，此时测距模块 A、B 所测距离增大，测距模块 C 所测距离减小，在上述两种状态下，仿形旋转机构都需绕点 O' 旋转 $\angle B'O'O$ 才能回到正常状态以继续割胶。

仿形旋转机构具体工作原理如图 13 所示，在计算时令所测树干为标准圆弧形，且测距模块 A、B、C 之间的水平距离 L_{AB} 与 L_{BC} 相比于树围较小。当机构处于正常状态时，如图 13a 所示，可知测距模块 A、B、C 所测距离与树干半径关系式为

$$\begin{cases} S_{CC_1'} - S_{BB_1'} = r_d - \sqrt{r_d^2 - L_{BC}^2} \\ \sin\theta_{M1} = \dfrac{L_{BC}}{r_d} \end{cases} \tag{19}$$

式中　$S_{BB_1'}$——正常状态模块 B 所测距离，mm

$S_{CC_1'}$——正常状态模块 C 所测距离，mm

L_{BC}——模块 BC 间的水平距离，mm

θ_{M1}——点 O 与 B_1'、C_1' 两点所成夹角，(°)

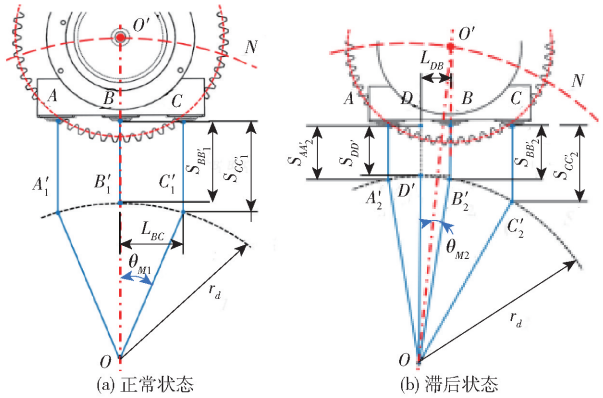

图 13　仿形旋转机构工作原理图

Fig. 13　Working principle of profiling rotary mechanism

当仿形旋转机构处于滞后状态，如图 13b 所示，令点 O 到模块 A、B、C 所在直线的垂线垂足为 D，直线 OD 与树干表面交点为 D'，则测距模块 A、B、C 所测距离与树干半径关系式为

$$\begin{cases} S_{BB_2'} - S_{DD'} = r_d - \sqrt{r_d^2 - L_{DB}^2} \\ S_{AA_2'} - S_{DD'} = r_d - \sqrt{r_d^2 - (L_{AB} - L_{DB})^2} \\ S_{CC_2'} - S_{DD'} = r_d - \sqrt{r_d^2 - (L_{BC} + L_{DB})^2} \\ \arcsin\dfrac{L_{DB}}{r_d} - \theta_{M2} = \arcsin\dfrac{L_{DB}}{S_{OO'}} \end{cases} \tag{20}$$

式中　$S_{AA_2'}$——滞后状态模块 A 所测距离，mm

$S_{BB'_2}$——滞后状态模块 B 所测距离,mm
$S_{CC'_2}$——滞后状态模块 C 所测距离,mm
$S_{DD'}$——滞后状态 D、D'两点间的距离,mm
$S_{OO'}$——滞后状态 O、O'两点间的距离,mm
L_{DB}——滞后状态 B、D 两点间的距离,mm
θ_{M2}——点 O 与 O'、B'_2 两点所成夹角,(°)

为了提高机构旋转精确度和稳定性,选取测距模块 A、B、C 间距离为 $L_{BC}=L_{AB}=35$ mm,选用 TOF050F 型激光测距传感器,其工作频率为 0 ~ 400 kHz,测量时间小于 30 ms,高精度模式下测量范围为 20 ~ 200 mm,工作电流最大值为 40 mA,可在温度 -20 ~ 70℃正常工作,为避免接近测距盲区而影响模块测距效果,设置其有效测量范围为 30 ~ 180 mm,使用 IIC 串口通讯模式,设置激光测距模块工作频率为 40 Hz,在每秒内测量 3 次数据并取平均值作为此时刻的最终数据。

正常状态,测距模块 B 所测距离值 $S_{BB'_1}$ 即为测距模块 B 到仿形块末端的距离,根据贴树割胶机构的设计可知 $S_{BB'_1}$ 为 42 ~ 65 mm,r_d 为 71 ~ 115 mm,由式(19)可知 $S_{CC'_1}$ 与 $S_{BB'_1}$ 的差值为 5.5 ~ 9.2 mm,则 $S_{CC'_1}$ 和 $S_{AA'_1}$ 为 47.5 ~ 75 mm,θ_{M1} 为 17.7° ~ 29.5°。

超前状态,根据三轴移动机构设计,装置运动线速度 v_R 为 8.49 ~ 11.05 mm/s,则每工作 500 ms 测距模块 B 偏离直线 OD 的距离 L_{DB} 为 4.3 ~ 5.5 mm,$S_{OO'}$ 为点 O 和点 O'的直线距离,设机构在橡胶树树围外 100 mm 处绕树割胶,即 $S_{OO'}=(r_d+100)$ mm,选取 L_{DB} 最小值和最大值并结合式(20)可得,随着橡胶树半径 r_d 的改变,模块 A、C 所测距离的变化量如图 14 所示。

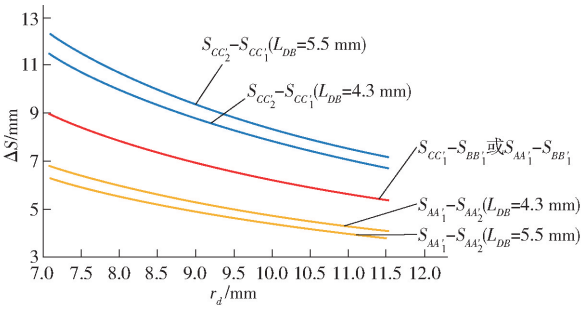

图 14 不同状态下模块 A、C 所测距离的变化量

Fig. 14 Change of measured value of module A and C in different states

装置正常工作,机构由正常状态变成超前状态时,由图 14 可知,模块 A 测量值为 1.3 ~ 2.8 mm,模块 C 测量值为 1.5 ~ 3.5 mm,模块 A、C 测量值的差值为 2.8 ~ 6.3 mm,则 $S_{AA'_2}$ 为 39.2 ~ 63.2 mm,$S_{CC'_2}$ 为 43.5 ~ 68.5 mm,模块 B 变化量较小,不做参考;由式(20)可知 θ_{M2} 为 1.0° ~ 2.6°,即每工作 500 ms 至少需要仿形旋转机构中的大齿轮旋转 1.0°,以扩大机构大齿轮旋转范围为原则,在满足舵机 2 能够为割胶刀头提供适宜作用力的基础上,选取模数 m_2 为 2 mm 的一组齿轮,参数如表 5 所示。

表 5 小齿轮和大齿轮参数

Tab. 5 Parameters of pinion-gear and bull-gear

参数	齿数 Z	分度圆直径 d/mm	中心距 a_w/mm	压力角 β/(°)	齿厚 S_Z/mm
小齿轮	20	40	76	20	8
大齿轮	56	112	76	20	8

根据齿轮设计,可知传动比 $i_{12}=Z_2/Z_1=2.8$,选用可进行 360°旋转的 60 kg 扭矩舵机,控制精度最小为 1°,则大齿轮旋转可控精度为 0.4°,刀头切割原生树皮切割力为 30 ~ 50 N,满足设计要求。

2.3 驱动控制模块设计

整机控制模块程序框图如图 15 所示,采用 STM32F103 开发板作为控制器,通过 3 个 DM8640H 型驱动模块实现三轴移动机构完成割胶轨迹,通过 2 个舵机和 1 个无刷电机实现装置仿形贴树和刀头震动割胶,为保障装置在 1 d 内完成多株橡胶树的割胶作业,采用外部框架搭载 24 V 直流电电源的方式为开发板和驱动模块供电。

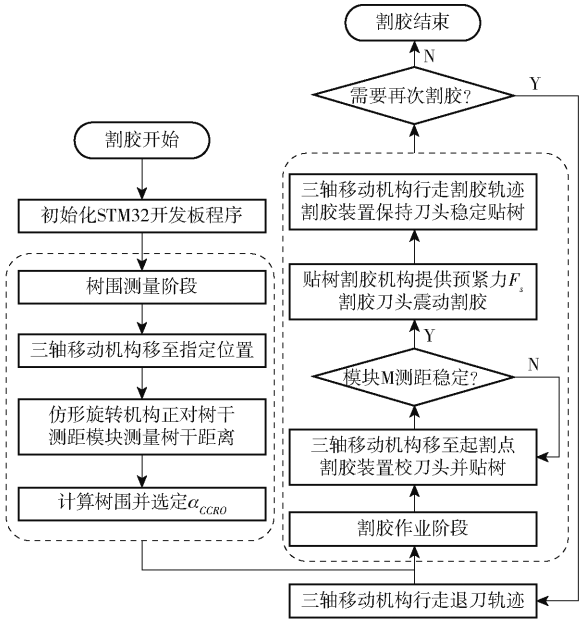

图 15 控制模块程序框图

Fig. 15 Block diagram of control module

3 割胶试验

为有效验证基于激光仿形的三轴式自动割胶装置的实际工作性能,搭建移除移动式底盘的室内割胶试验装置,如图 16 所示,于 2024 年 8 月在海南省海口市海南大学农机实验室内开展割胶作业试验。

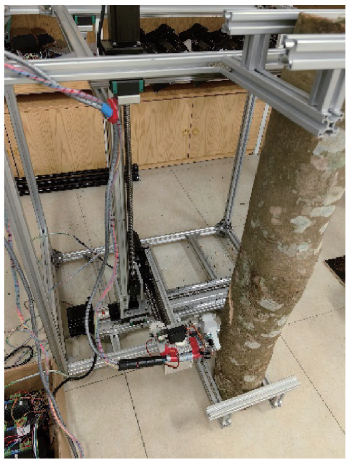

图 16　割胶试验

Fig. 16　Test of rubber tapping

3.1　试验方式

选取割胶角度、割胶深度和待割橡胶树树围为试验因素，其中割胶角度为半螺旋割胶轨迹的升角；割胶深度为从树皮表面沿着垂直于树干方向到割线内切口之间的距离，即装置割去树皮宽度；待割橡胶树树围为起割点所在水平面所测量的橡胶树树围。在前期仿真与预试验的基础上，确定三因素三水平正交试验各因素取值如表 6 所示。每组试验重复割胶 3 次，取平均值作为试验结果。

表 6　试验因素编码

Tab. 6　Coding of test factors

编码	因素		
	割胶角度/(°)	割胶深度/mm	待割橡胶树树围/mm
-1	24	4	500
0	28	5	575
1	32	6	650

3.2　试验指标

割胶作业过程中，木质部和水囊皮的受损会造成橡胶树减产或死亡，而割胶面平整性影响着皮下乳管的切割率和胶汁的收集，因此选取割胶深度合格率与割面平滑度合格率为试验指标。

割胶深度合格率测量方法为在完成一次割胶后，沿着割胶轨迹在离前后水线 30 mm 处及割线中间每隔 1 cm 进行标记，使用游标卡尺测量每点从树皮表面沿着垂直于树干方向到割线内切口之间的距离。当所测割胶深度位于设定标准值 ±0.2 mm 的范围区间时，为合格，计算式为

$$Q = \frac{u}{U} \times 100\% \tag{21}$$

式中　Q——割胶深度合格率，%

u——合格测点数　　U——总测点数

割面平滑度合格率测量方法为在完成一次割胶后，测定有明显波浪、锯齿状和台阶状割线长度，测定 5 刀次，取平均值作为合格率，计算式为

$$P = \left(1 - \frac{\sum e_i}{5E}\right) \times 100\% \tag{22}$$

式中　P——割面平滑度合格率，%

e_i——第 i 刀次割线出现波浪、锯齿状和台阶状长度，mm

E——割线总长度，mm

3.3　试验结果与分析

选用 $L_3(3^3)$ 正交表，割胶试验结果如表 7 所示，X_1、X_2、X_3 为割胶角度、割胶深度和待割橡胶树树围编码，Y_1、Y_2 为割胶深度合格率与割面平滑度合格率。

表 7　割胶试验方案和结果

Tab. 7　Test scheme and results of tapping

序号	因素			割胶深度合格率 Y_1/%	割面平滑度合格率 Y_2/%
	X_1	X_2	X_3		
1	0	-1	1	88.2	69.0
2	-1	0	-1	89.5	84.3
3	0	1	1	83.3	86.4
4	-1	1	0	86.6	91.8
5	1	-1	0	87.4	66.4
6	0	0	0	88.9	82.2
7	-1	0	1	90.2	86.8
8	1	0	-1	80.8	70.5
9	0	1	-1	81.0	80.8
10	1	1	0	79.4	84.1
11	0	-1	-1	86.7	68.7
12	0	0	0	87.3	83.1
13	1	0	1	84.3	74.3
14	-1	-1	0	92.8	83.6
15	0	0	0	89.1	84.3
16	0	0	0	87.2	81.9
17	0	0	0	87.6	81.5

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，得割胶深度合格率和割面平滑度合格率二次多项式回归模型为

$$Y_1 = 88.02 - 3.40X_1 - 3.10X_2 + 1.00X_3 - 0.45X_1X_2 + 0.70X_1X_3 + 0.20X_2X_3 - 0.035X_1^2 - 1.44X_2^2 - 1.78X_3^2 \tag{23}$$

$$Y_2 = 82.60 - 6.40X_1 - 6.92X_2 + 1.53X_3 - 2.37X_1X_2 + 0.35X_1X_3 + 1.33X_2X_3 - 0.813X_1^2 - 1.94X_2^2 - 4.44X_3^2 \tag{24}$$

由表 8、9 可知，回归模型 P 均小于 0.000 1，而失拟合系数 P 均大于 0.05，表明回归模型拟合程度高，具有较好的适应性和较高的准确性，且 3 个回归项在回归模型中交互影响显著。由割胶角度、割胶深度和待割橡胶树树围 P 可判断 3 个试验因素对

割胶深度合格率和割面平滑度合格率影响均为极显著或显著。由表 8、9 可知,试验因素对割胶深度合格率影响从大到小依次为割胶角度、割胶深度和待割橡胶树树围;试验因素对割面平滑度合格率影响从大到小依次为割胶深度、割胶角度和待割橡胶树树围。

表 8 割胶深度合格率二次多项式模型方差分析

Tab. 8 Variance analysis of quadratic polynomial model of qualified rate of tapping depth

方差源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	203. 77	9	22. 64	29. 09	<0. 000 1 **
X_1	92. 48	1	92. 48	118. 83	<0. 000 1 **
X_2	76. 88	1	76. 88	98. 78	<0. 000 1 **
X_3	8. 00	1	8. 00	10. 28	0. 014 9 *
X_1X_2	0. 81	1	0. 81	1. 04	0. 341 6
X_1X_3	1. 96	1	1. 96	2. 52	0. 156 5
X_2X_3	0. 16	1	0. 16	0. 21	0. 664 0
X_1^2	0. 01	1	0. 01	0. 01	0. 937 4
X_2^2	8. 67	1	8. 67	11. 14	0. 012 5 *
X_3^2	13. 42	1	13. 42	17. 24	0. 004 3 **
残差	5. 45	7	0. 78		
失拟项	2. 14	3	0. 71	0. 86	0. 529 6
纯误差	3. 31	4	0. 83		
总和	209. 22	16			

注:* 表示影响显著(0. 01 ≤ P < 0. 05),** 表示影响极显著(P < 0. 01),下同。

表 9 割面平滑度合格率二次多项式模型方差分析

Tab. 9 Variance analysis of quadratic polynomial model of qualified rate of tapping surface smoothness

方差源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	863. 64	9	95. 96	97. 56	<0. 000 1 **
X_1	327. 68	1	327. 68	333. 15	<0. 000 1 **
X_2	383. 65	1	383. 65	390. 05	<0. 000 1 **
X_3	18. 61	1	18. 61	18. 92	0. 003 4 **
X_1X_2	22. 56	1	22. 56	22. 94	0. 002 0 **
X_1X_3	0. 42	1	0. 42	0. 43	0. 533 15
X_2X_3	7. 02	1	7. 02	7. 14	0. 031 9 *
X_1^2	2. 78	1	2. 78	2. 83	0. 136 6
X_2^2	15. 81	1	15. 81	16. 07	0. 005 1 **
X_3^2	82. 91	1	82. 91	84. 30	<0. 000 1 **
残差	6. 89	7	0. 98		
失拟项	1. 89	3	0. 63	0. 50	0. 700 7
纯误差	5. 00	4	1. 25		
总和	870. 52	16			

由表 10 可知,割胶深度合格率模型决定系数(R^2)、校正决定系数(R^2_{adj})和预测决定系数(R^2_{pre})分别为 0. 974 0、0. 940 5 和 0. 811 6;在割面平滑度合格率模型中,分别为 0. 992 1、0. 981 9 和 0. 956 4,均接近于 1,且校正决定系数与预测决定系数差异小于 0. 2,表明可用该模型解释试验差异较多,与实际数据拟合程度高,回归模型相关性较好。两模型变异系数和信噪比(Adeq precision)分别为 1. 02%、1. 24% 和 19. 21、35. 04,其中变异系数小于 10%,信噪比远大于 4,说明割胶深度合格率和割面平滑度合格率具有较高的可靠性。

表 10 二次多项式模型统计指标

Tab. 10 Statistical index of quadratic polynomial model

割胶深度合格率	数值	割面平滑度合格率	数值
标准差/%	0. 88	标准差/%	0. 99
平均值/%	86. 49	平均值/%	79. 98
变异系数/%	1. 02	变异系数/%	1. 24
决定系数	0. 974 0	决定系数	0. 992 1
校正决定系数	0. 940 5	校正决定系数	0. 981 9
预测决定系数	0. 811 6	预测决定系数	0. 956 4
信噪比	19. 21	信噪比	35. 04

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。割胶角度和割胶深度对割胶深度合格率响应曲面如图 17a 所示,割胶角度由 32°减小到 24°过程中,割胶深度越小,贴树割胶机构所受阻力也越小,割胶深度合格率越大,割胶深度越大,贴树割胶机构所受阻力也越大,割胶深度合格率越小;割胶角度和割胶深度对割面平滑度合格率响应曲面如图 17b 所示,割胶角度由 32°减小到 24°过程中,割胶深度越大,仿形旋转机构旋转越稳定,割面平滑度合格率越大,割胶深度越小,仿形旋转机构旋转越抖动,割面平滑度合格率越小;待割橡胶树树围由 500 mm 增加到 650 mm 过

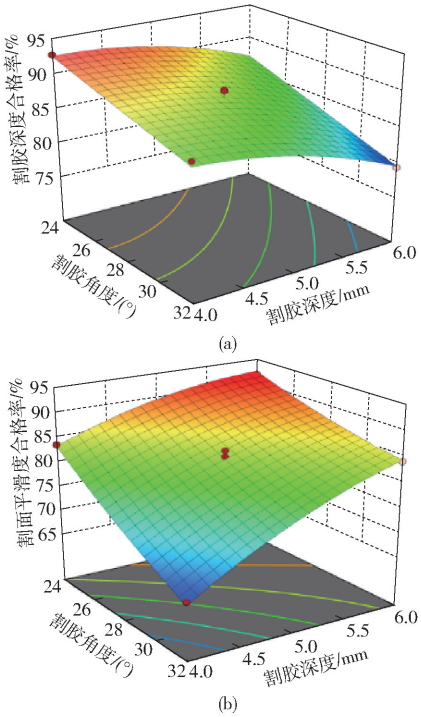

图 17 交互效应响应曲面(X_3 = 0)

Fig. 17 Interaction response surface

程中，割胶角度越大，割胶深度合格率和割面平滑度合格率越小，割胶角度越小，割胶深度合格率和割面平滑度合格率越大。由图 17 可知，当割胶角度 24°、割胶深度 4.96 mm、待割橡胶树树围 583 mm 时，割胶深度合格率 91.5% 和割面平滑度合格率 89.7%，此时为割胶机最佳参数组合。

为验证最优组合在三轴式自动割胶装置中的工作效果，将割胶角度 24°、割胶深度 4.96 mm 和待割橡胶树树围 583 mm 作为最优组合，进行 3 次验证性试验，试验测得割胶深度合格率分别为 90.11%、91.65%、92.35%，平均合格率为 91.38%；割面平滑度合格率分别为 89.44%、89.84%、89.9%，平均合格率为 89.73%，能够满足割胶作业要求。

4　结论

（1）设计了一种基于激光仿形的三轴式自动割胶装置，确定三轴移动机构结构参数和算法程序，结合 STM32 开发板控制割胶轨迹，实现树围为 450 ~ 720 mm 橡胶树在离地高度 1 000 ~ 1 500 mm 内进行 3 个不同割胶角度割胶作业。

（2）设计贴树割胶机构和仿形旋转机构，并通过分析仿形旋转机构 3 种不同状态下的距离测量值，采用 2 个舵机和 4 个激光测距模块配合，在割胶深度 4 ~ 6 mm 内完成稳定贴树仿形割胶。

（3）通过 Box - Behnken 试验研究割胶角度、割胶深度、待割橡胶树树围 3 个试验因素对割胶深度合格率和割面平滑度合格率的影响规律。试验结果表明因素最优值为：割胶角度 24°、割胶深度 4.96 mm、待割橡胶树树围 583 mm。

（4）以最优参数组合进行 3 次验证试验，得到割胶深度合格率为 91.38% 和割面平滑度合格率为 89.73%，满足割胶技术要求。

参　考　文　献

[1] SALEHI M, BAHMANKAR M, NAGHAVI M R, et al. Rubber and latex extraction processes for *Taraxacum kok-saghyz*[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 178: 114562.

[2] SILVA M J, CLARO P I C, DA SILVA J C, et al. Evaluation of the physicochemical properties of natural rubber from hevea brasiliensis clones[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 171: 113925.

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

[4] YANG Hui, SUN Zejin, LIU Junxiao, et al. The development of rubber tapping machines in intelligent agriculture: a review[J]. Applied Sciences, 2022, 12(18): 9304.

[5] 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)

[6] ALI M F, ABDUL A A, WILLIAMS A. Assessing yield and yield stability of hevea clones in the southern and central regions of Malaysia[J]. Agronomy, 2020, 10(5): 643.

[7] 孙向前，黎晟沅. 云南天然橡胶产业高质量发展策略与思考[J]. 橡胶工业，2023，70(6)：474 - 479.
SUN Xiangqian, LI Shengyuan. High-quality development strategy of Yunnan NR industry[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(6): 474 - 479. (in Chinese)

[8] LI Shute, ZHANG Jie, ZHANG Jian, et al. Study on the secant segmentation algorithm of rubber tree[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1004: 012033.

[9] 莫业勇，杨琳. 2022 年国内外天然橡胶产业发展情况和 2023 年形势分析[J]. 中国热带农业，2023(4)：19 - 25，70.
MO Yeyong, YANG Lin. Analysis of the development of domestic and foreign natural rubber industry in 2022 and the situation in 2023[J]. China Tropical Agriculture, 2023(4): 19 - 25, 70. (in Chinese)

[10] 李杨，潘媛，罗平，等. 橡胶树日间割胶试验初报[J]. 热带作物学报，2023，44(5)：937 - 945.
LI Yang, PAN Yuan, LUO Ping, et al. Preliminary report on daytime rubber tapping test of rubber trees[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(5): 937 - 945. (in Chinese)

[11] ZHANG Heng, WEN Zhentuo, CHEN Yaya, et al. Research on cutting angle design optimization of rubber cutter based on discrete element method[J]. Agriculture, 2023, 13(10): 1894.

[12] 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)

[13] 刘宏新，王登宇，郭丽峰，等. 先进设计技术在农业装备研究中的应用分析[J]. 农业机械学报，2019，50(7)：1 - 18.
LIU Hongxin, WANG Dengyu, GUO Lifeng, et al. Development of advanced design technology and its application in agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 1 - 18. (in Chinese)

[14] 赵博，张巍朋，苑严伟，等. 农业装备运维与作业服务管理信息化技术研究进展[J]. 农业机械学报，2023，54(12)：1 - 26.
ZHAO Bo, ZHANG Weipeng, YUAN Yanwei, et al. Research progress in information technology for agricultural equipment

maintenance and operation service management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12):1 - 26. (in Chinese)
[15] 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, 2019,506(1):12002.
[16] 王驭陌,张燕. 基于 TRIZ 理论的智能割胶刀设计[J]. 湖北农业科学,2015, 54(12): 3010 - 3014.
WANG Yumo, ZHANG Yan. Design of intelligent tapping knife based on TRIZ theory[J]. Hubei Agricultural Sciences,2015, 54(12):3010 - 3014. (in Chinese)
[17] 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)
[18] 王玲玲,黄敞,陈娃容,等. 机械割胶装备切割仿形机构设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(2): 62 - 70.
WANG Lingling, HUANG Chang, CHEN Warong, et al. Design and experiment of cutting feeler mechanism for rubber tapping machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024,45(2):62 - 70. (in Chinese)
[19] 王玲玲,陈娃容,吴思浩,等. 农机农艺融合的高效割胶技术优化设计与应用[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(5): 22 - 28.
WANG Lingling, CHEN Warong, WU Sihao, et al. Optimal design and application of high efficiency rubber tapping technology based on the integration of agricultural machinery and agronomy[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024,45(5):22 - 28. (in Chinese)
[20] ZHANG Chunlong, SHENG Xiyu, ZHANG Shunlu, et al. Design and experiment of portable electric tapping machine[C]// 2018 ASABE Annual International Meeting,2018.
[21] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 1 - 18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(8):1 - 18. (in Chinese)
[22] 孟志军,王昊,付卫强,等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 1 - 24.
MENG Zhijun, WANG Hao, FU Weiqiang, et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):1 - 24. (in Chinese)
[23] 辛亮,王明成,孙国玉,等. 番茄钵苗移栽探出式取钵机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 96 - 105.
XIN Liang, WANG Mingcheng, SUN Guoyu, et al. Design and experiment of extensible type of picking seedling pot mechanism for tomato pot seedling transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024, 55(3):96 - 105. (in Chinese)
[24] 王秀,刘蒙滋,翟长远,等. 蔬菜移栽夹茎式取苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 122 - 132.
WANG Xiu, LIU Mengzi, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of vegetable transplanting clip stem seedling device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):122 - 132. (in Chinese)
[25] 郭大方,杜岳峰,栗晓宇,等. 云-雾-边-端协同的农业装备数字孪生系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 133 - 141.
GUO Dafang, DU Yuefeng, LI Xiaoyu, et al. Digital twin system for agricultural machinery with cloud - fog - edge - terminal architecture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):133 - 141. (in Chinese)
[26] 王韦韦,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)
[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] 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)
[30] CHEN Yaya, ZHANG Heng, LIU Junxiao, 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.
[31] ZHOU Hang, ZHANG Shunlu, ZHANG Junxiong, et al. Design, development, and field evaluation of a rubber tapping robot [J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(1):28 - 54.
[32] 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)
[33] 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)
[34] 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.