

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.12.007

油茶林立式螺旋松土除草机设计与试验

许 静^{1,2} 刘宝伟^{1,2} 陈平录^{1,2} 王俊南¹ 刘木华^{1,2}
(1. 江西农业大学工学院, 南昌 330045; 2. 江西省现代农业装备重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 为实现低矮密集型油茶林松土、除草、除灌一体化作业,解决油茶林土壤板结、草灌杂生等问题,设计了立式螺旋松土除草机。通过对油茶林常见杂草、杂灌根系的物理力学特性分析,结合刀具运动分析,设计了立式螺旋耕刀。采用 Hertz – Mindlin bonding 接触模型建立了根土复合体模型,以降低功耗为目标对刀具参数进行了仿真优化,分析其对根土复合体的扰动情况,并试制样件进行了土槽试验,检验耕作效果,验证了仿真分析的可靠性。仿真结果表明:优化后立式螺旋耕刀对根土复合体的扰动率可达到 91.41%,切削土壤时最大功耗为 0.16 kW;切削根土复合体时最大功耗为 0.77 kW。土槽试验表明:耕刀的耕深稳定性系数为 92.34%,碎土率 95.00%,除根率 95.30%;螺旋耕刀在切削土壤时,实际测得最大转矩为 7.93 N·m,比仿真值低 6.57%;切削根土复合体时,实际测得最大转矩为 34.84 N·m,比仿真值低 4.91%,两者比较接近,验证了设计的正确性。设计的立式螺旋松土除草机满足丘陵山地油茶林松土、除草、除灌作业要求。

关键词: 油茶林; 松土; 立式螺旋耕刀; 离散元; 根土复合体

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)12-0079-09 OSID: 

Development and Experiment of Vertical Spiral Cutter for Soil Loosening and Weeding in *Camellia oleifera* Forest

XU Jing^{1,2} LIU Baowei^{1,2} CHEN Pinglu^{1,2} WANG Junnan¹ LIU Muhua^{1,2}
(1. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China
2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment of Jiangxi Province, Nanchang 330045, China)

Abstract: Due to the lack of management, *Camellia oleifera* forests would encountered problems such as soil compaction and mixed growth of grass and shrubs. In order to achieve integrated operations of soil loosening, weeding, and clearing shrubs in low and intensive *Camellia oleifera* forests, a vertical spiral machine for soil loosening and weeding was developed. The vertical spiral cutter was designed by analyzing the physical and mechanical characteristics of common weeds and miscellaneous shrubs roots in *Camellia oleifera* forests, and combined with motion analysis of cutting tools. The root-soil composite model was established by using Hertz – Mindlin bonding contact model, with the goal of reducing power consumption, the parameters of the cutting tool were simulated and optimized, and the disturbance of root-soil composite were analyzed by the optimized cutter. In addition, an actual cutter was manufactured and the soil bin experiment was conducted, and it verified the reliability of the simulation results. The simulation results showed that the disturbance of soil-root complex by the optimized vertical spiral cutter can reach 91.41%, the maximum power consumption when cutting soil alone was 0.16 kW and the maximum power consumption when cutting the root-soil composite was 0.77 kW. The soil bin experiment results showed that the coefficient of stability of the plowing depth was 92.34%, the soil fragmentation rate was 95.00%, and the root removal rate was 95.30%; the maximum torque measured in the case of cutting soil alone was 7.93 N·m and it was 6.57% lower than the simulation value; the actual measured maximum torque was 34.84 N·m in the case of cutting the root-soil composite, and it was 4.91% lower than the simulation value; the correctness of the design was verified by the close agreement between the experimental and simulation values. The vertical spiral soil loosening and weeding machine met the

收稿日期: 2023-08-19 修回日期: 2023-09-20
基金项目: 江西省农业关键核心技术攻关项目(JXNK20230804-03)、井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目(20222-051256)和江西省林业局油茶研究专项(YCYJZX[2023]211)
作者简介: 许静(1981—),女,教授,博士,主要从事智能农机装备和农业信息化研究,E-mail: xujing0085@sina.com
通信作者: 陈平录(1979—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail: pingch757@163.com

requirements for soil loosening, weeding, and irrigation operations in *Camellia oleifera* forest in hilly and mountainous areas.

Key words: *Camellia oleifera* forest; soil loosening; vertical spiral cutter; discrete element; root-soil composite

0 引言

油茶是世界四大木本油料植物之一,也是我国非常重要的木本油料树种^[1]。目前,我国油茶种植面积保持增长趋势,但是油茶单产较低。导致该状况的原因之一在于油茶林疏于管理,未及时进行松土、除草和除灌作业,油茶林土壤板结且杂草、杂灌丛生,阻碍油茶吸收养分,严重影响油茶果质量,对油茶产业造成巨大损失^[2]。油茶的丰产栽培技术^[3-4]指出,清除杂草和灌木、疏松土质可改善油茶林的环境,利于提高油茶产量,因此油茶林的松土、除草和除灌工作极为必要。

现阶段油茶林的松土、除草及除灌工作,主要由作业效率低的人工操作简易农具形式或采用对环境不友好的化学药剂完成。油茶林大多数分布在南方丘陵山地,且很大一部分油茶林采用条带种植模式,油茶成林后枝条低矮交错,耕作空间狭窄,大功率机械无法进入。此外,油茶林地土质粘、易板结、植株种类多样等特征,给小型耕作机械也带来了难度。在清除杂草、杂灌时,其根系与土壤粘结形成阻碍作用更大的根土复合体^[5],且根系易缠绕工作部件,耕作难度很大。

对于传统旋耕机被杂草、杂灌根系缠绕的问题,可通过犁铧式^[6]或凿铲式^[7]工作部件来解决。文献[8-9]针对退化草原修复机械开展工作,利用切根刀扰动根土复合体完成开沟,研发了9QP-830型盘齿式破土切根机及草地切根施肥补播复式改良机。朱惠斌等^[10]通过建立破茬开沟装置-秸秆-土壤离散元模型,研究开沟刀具对土壤和秸秆的切削作用,获得了良好的机具参数,实现了旋耕刀在稻茬地的破茬开沟。RAVSHANOV^[11]通过研究机具对田间作物根系发育区的根土复合体的扰动,优化犁刀参数,研制出具有整平灌木和犁沟作用的组合机,实现了犁式开沟刀具在田间的开沟功能。ALIAKBAR等^[12]通过研究折弯窄型开沟刀对根土复合体的扰动情况,实现了更窄的开沟宽度,减少了开沟抛出的土壤,很大程度减少了开沟时土壤发生松动的情况,完成秸秆地的开沟作业。赵淑红等^[13]通过离散元法建立土壤-玉米根茬模型,研究了深松铲对根土复合体的扰动效果,解决了机具缠草问题,实现了铲式耕具对玉米地的深松作业。

针对油茶林同时松土、除草和除灌的问题,本文以降低刀具在工作过程中的功耗为目标,设计一种基于立式铣削,具有疏松土壤和切断杂草、杂灌根系的立式螺旋松土除草机,通过对油茶林常见杂草、杂灌根系的物理力学特性以及螺旋耕刀叶片的运动分析研究,提出适宜油茶林同时松土、除草、除灌的立式螺旋刀具设计方法,采用离散元方法对刀具进行优化设计,并进行土槽试验验证优化后刀具的作业效果。

1 松土除草机结构设计与工作原理

1.1 整机结构设计

如图1所示,本文设计的松土除草机主要由遥控式电动履带底盘以及通过滑动模组挂接在履带底盘前方的松土除根装置组成。松土除根装置由直流电机、升降平台、立轴、固定架、齿轮箱和松土除根刀组成,其直流电机由安装在履带底盘中的动力电池供能。

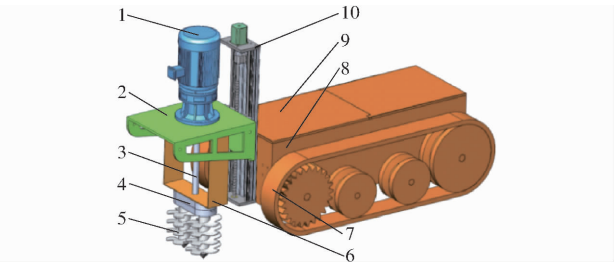


图1 松土除草机结构简图

Fig.1 Structure diagram of soil loosening and weeding machine

1. 直流电机 2. 升降台 3. 立轴 4. 齿轮箱 5. 松土除根刀具
6. 固定架 7. 履带 8. 底盘 9. 电池 10. 滑动模组

1.2 工作原理

松土除草机工作时,直流电机的动力通过立轴传动到齿轮箱,齿轮箱将动力一分为二传动到两把松土除根刀具,驱动两把松土除根刀具同向旋转。松土除根刀具转动平稳后,控制滑动模组带动升降台下降。待松土除根刀具完全入土后,遥控履带底盘在操作人员控制下前进,带动松土除草装置按照需求运动轨迹不断进行松土、除草和除灌作业,直至耕作结束。

2 松土除根刀具设计

2.1 松土除草刀切根需求

通过实地调研江西省南昌市进贤县油茶林基

地,获取了主要杂草、杂灌类型,并对各植株根系进行剪切试验得到相应的剪切力。根据试验可知,除商路个别根系直径达到 42.5 mm,绝大多数杂草、杂灌的根系直径在 27 mm 以下,剪切力在 820 N 以下(表 1)。因此,设计的耕刀应满足切除根系直径和剪切力的需求。

表 1 根系剪切试验结果
Tab.1 Result of root shear test

类型	直径/mm	剪切力/N
飞蓬	5.1 ~ 10.9	77 ~ 819
苦苣	6.6 ~ 17.8	33 ~ 686
菝葜	3.4 ~ 11.0	398 ~ 585
商陆	7.8 ~ 42.5	67 ~ 585
细叶芒	2.5 ~ 7.3	63 ~ 405

2.2 刀具选型及结构设计

油茶林常见杂草、杂灌的根系根据其构型不同可以分为直根系和须根系 2 类^[14],须根系植物的根系在土壤中呈竖直向下,根系植物的根系在土壤中主根竖直向下而侧根向四周发散,且直根系植物的根系强度主要集中在主根上。切割竖直根系适宜采用水平方向布置的刀刃,如犁式刀、水平圆盘刀^[15]以及立式螺旋耕刀^[16]等。犁式刀的碎土率低,水平圆盘刀仅用于在土壤上部除草、除灌。而立式螺旋刀的刀刃呈水平布置,且具有低功耗、碎土效果好等优点,若能够合理优化其刃齿,可成为松土、除草、除灌一体式刀具的合理选择。因此本文采用带刃齿的立式螺旋耕刀。

立式螺旋耕刀的结构如图 2 所示,包括耕刀轴与带刃齿螺旋叶片,其中螺旋叶片焊接在耕刀轴上。耕刀轴由空心轴和入土锥组成,空心轴的设计可减少耕刀重量,入土锥的设计便于耕刀钻入土壤。为顺利切断土壤中的根系,螺旋叶片上加工刃齿,刃齿的设计采用锯齿往复切割的原理,刃齿的齿形可通过锯齿齿形由直角坐标系向极坐标系转换而获取,如图 3 所示。

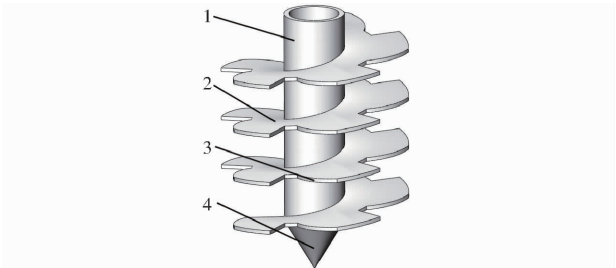


图 2 立式螺旋耕刀结构图

Fig.2 Structure graph of vertical spiral cutter

1. 耕刀轴 2. 螺旋叶片 3. 刃齿 4. 入土锥

2.3 立式螺旋耕刀叶片运动分析

螺旋叶片在耕作过程中旋转切削根土复合体,

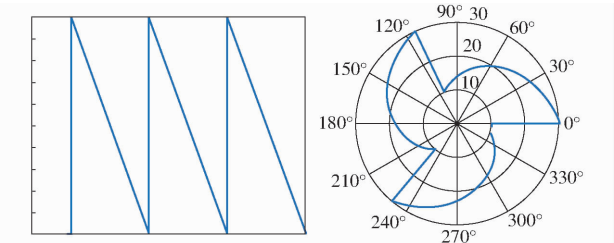


图 3 锯齿齿形在直角坐标系和极坐标系之间的转换

Fig.3 Conversion of serrated tooth shape between Cartesian and polar coordinate systems

并随着整机前进,因此螺旋叶片的运动由旋转和直线前进两种运动合成。螺旋耕刀叶片的运动轨迹需符合余摆线的要求^[17],才能有效切削根土复合体。对螺旋耕刀叶片的轨迹建立平面坐标系,设置 x 为水平方向,设置 y 为竖直方向,竖直方向为螺旋耕刀的前进方向,螺旋叶片上的任意一点 $Q(x,y)$ 的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = R\sin(\omega t) \\ y = R\cos(\omega t) + v_f t \end{cases} \tag{1}$$

式中 R ——点 Q 回转半径, m
 v_f ——螺旋耕刀前进速度, m/s
 ω ——螺旋耕刀角速度, rad/s
 t ——时间, s

由式(1)可作出螺旋叶片上的任意一点的运动轨迹图,如图 4 所示。

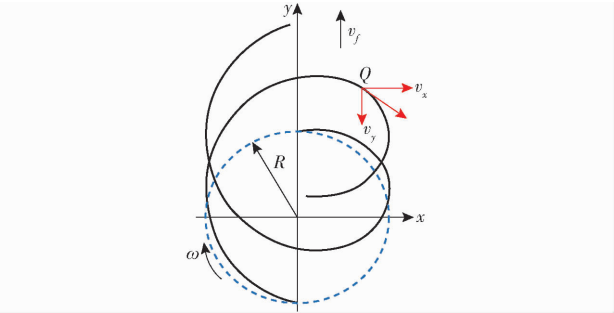


图 4 螺旋耕刀运动轨迹

Fig.4 Motion trajectory diagram of vertical spiral cutter

螺旋叶片上任一点在 x 、 y 方向上的速度 v_x 、 v_y 分别为

$$v_x = \frac{dx}{dt} = R\omega\cos(\omega t) \tag{2}$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = v_f - R\omega\sin(\omega t) \tag{3}$$

可知螺旋叶片上任一点的绝对速度 v 为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_f^2 + R^2\omega^2 - 2v_fR\omega\sin(\omega t)} \tag{4}$$

设定旋耕速比 k 为螺旋叶片上任意一点的线速度与前进速度之比,公式为

$$k = \frac{R\omega}{v_f} \tag{5}$$

将式(5)代入式(3)中,可得

$$v_y = v_f(1 - k\sin(\omega t)) \quad (6)$$

由式(6)可知, k 值直接影响螺旋耕刀在土壤中运动时的轨迹变化,同时可判断刀具能否正常向后方切削。当 $k \leq 1$ 时,始终有 $v_y \geq 0$,即无论螺旋耕刀处于怎样的位置,螺旋叶片上任意点的竖直分速度都为正,与前进方向一致,此时运动轨迹为摆线,该情况下的螺旋耕刀无法向后切土,会出现螺旋耕刀向前推土的现象;当 $k > 1$ 时,螺旋叶片上的点在旋转一定角度时,便会存在 $v_y < 0$ 的情况,此时螺旋叶片上的点的竖直分速度为负,与前进方向相反,运动轨迹为余摆线,该情况下的螺旋耕刀可正常向后切土,不会产生推土现象。综上可知,螺旋耕刀的工作参数设计应满足 $k > 1$ 的条件,即螺旋叶片上点的线速度 $R\omega$ 应大于螺旋耕刀的前进速度 v_f 。

以上分析作为螺旋耕刀结构参数与工作参数设计的理论基础和条件。

2.4 螺旋耕刀结构参数

耕刀轴的结构参数有:耕刀轴轴长 L 、轴外径 d 、轴内径 d_0 、锥长 L_0 。耕刀轴轴长需大于螺旋叶片一个安装位置的高度,根据油茶种植丰产栽培技术可知,浅松深度通常在 10 ~ 15 cm,即螺旋叶片高度为 150 mm,因此设计 L 为 170 mm;耕刀轴外径即螺旋叶片内径,综合考虑螺旋叶片加工水平和强度,设计 d 为 48 mm, d_0 为 42 mm;为保证耕刀入土顺利,入土锥入土角需设计为 30° ^[18],因此设计锥长 L_0 为 41.6 mm。

耕刀叶片的结构参数有:螺旋叶片高度 H 、外径 D 、内径 d 、厚度 h 和螺距 p 。根据耕作条件、油茶种植丰产栽培技术、加工水平和强度等方面要求,设计 H 为 150 mm, D 为 150 mm, d 为 48 mm, h 为 3 mm。螺距 p 会影响切削效率和耕作功耗。螺距 p 取值过小,螺旋叶片圈数多,刃齿密集,切削阻力和转矩增大;螺距 p 取值过大,螺旋叶片圈数少,切削土壤的间距增大,碎土率降低。螺距取值应在 30 ~ 50 mm,此时螺旋叶片圈数在 3 ~ 5 之间,可在能耗不高的情况下获得较高的切削效率。

2.5 刃齿结构参数

如图 5 所示,当螺旋叶片外径 D 和内径 d 确定后,决定刃齿结构的参数包括内基圆弧角 α 、切削刃轮廓线包络角 β 、外基圆弧角 γ 、切削刃轮廓线半径 R_1 、内基圆半径 R_2 和刃齿数。

根据文献[19]设定刀具转速为 200 r/min,由式(5)中 $k > 1$ 可知 $v_f < 125/\pi$,令螺旋叶片一圈内包含 m 个刃齿,切削根系时,叶片转过一个刃齿所用时间为 $3/(10m)$,此时刀具前进 $75/(2\pi m)$ 。根据根系剪切试验可知,强韧根系直径在 2.5 mm 以

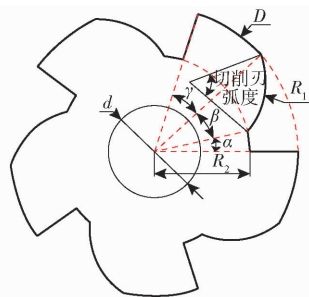


图 5 螺旋叶片俯视图

Fig. 5 Top view of spiral blades

上,为保证完全避免漏割,需满足 $75/(2\pi m) < 2.5$,即 $m > 4.8$ 。因此设计螺旋叶片一周刃齿个数 $m \geq 5$,需满足 $\alpha + \beta + \gamma \leq 72^\circ$ 。

α 和 β 影响刀具可切断根系直径 d_r 。 d_r 计算式为

$$d_r = 75 \sqrt{2 \left(1 - \cos \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \right)} \quad (7)$$

根据根系剪切试验可知,刀具需切断的根系直径在 27 mm 左右,因此 $\alpha + \beta = 42^\circ$,此时应满足 γ 在 30° 左右。

β 影响切削刃轮廓线长度, β 越大,切削时间越长; γ 影响外基圆弧长,外基圆的作用是防止切削后的根系重新进入区域,即推根效果, γ 越大,推根时间越长。为使切根与推根相互配合,切根时长与推根时长应相同,即 β 也应在 30° 左右。

R_2 会影响刃齿强度,可通过刃齿弯曲强度校核确定。由弯曲变形可知,刃齿受力时最大挠度为 $\Delta = Fl^3/(3EI)$,一般钢结构的主梁许用挠度 $[\Delta_r]$ 为 $l/400$,即

$$\Delta = \frac{Fl^3}{3EI} = \frac{4Fl^3}{Eb h^3} = \frac{l}{400} \quad (8)$$

$$\text{其中 } b = \frac{\pi}{5} \frac{75^2 - R_2^2}{75^2 - 24^2} \frac{\gamma}{\alpha + \beta + \gamma} \frac{75^2 - R_2^2}{75 - R_2} \quad (9)$$

$$l = 75 - R_2 \quad (10)$$

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

式中 F ——最大载荷, N

l ——刃齿长度, m

E ——钢材弹性模量,取 212 GPa

I ——刃齿惯性矩, m^4

b ——刃齿宽度, m

由式(8)、(9)可知,当 R_2 为 51 mm 时,最大载荷为 233.7 N,使用坚实度仪测量土壤阻力最大为 231 N,可满足强度要求,因此 R_2 取 51 mm。

切削刃弧度大于 $\pi/2$ 时,切削刃受力方向会出现相反的情况。为保证切削刃受力稳定,切削刃弧度不能超过 $\pi/2$,此时 D 、 R_1 、 R_2 和 β 之间的关系表

达式为

$$D^2/4 + R_2^2 - DR_2\cos\beta \leqslant 2R_1^2 \tag{11}$$

求解得到 R_1 为 28.3 mm, 即 R_1 不得低于 28.3 mm。当 R_1 为 54 mm 时, β 为 71.9°, 因此 R_1 应低于 55 mm。 R_1 越大, 切削刀轮廓线凸出程度越小, 刀具越平滑。

3 螺旋耕刀离散元仿真

螺旋叶片结构和刃齿结构是影响耕刀工作功耗的关键, 为了降低螺旋耕刀工作时的功耗, 本研究通过离散元仿真优化螺旋叶片结构参数和刃齿结构参数。

3.1 螺旋耕刀根土复合体离散元模型建立

在 EDEM 软件中, 利用半径为 3.5 mm^[20] 的单一颗粒建立土壤模型, 利用半径为 1 mm 的单一颗粒建立根系模型, 土壤和根系的接触模型都采用 Hertz - Mindlin bonding 接触模型。根系粘结刚度和粘结应力分别为 2.43×10^8 N/m 和 1×10^6 Pa, 粘结半径为 1.1 mm; 土壤粘结刚度和粘结应力分别为 1.5×10^8 N/m 和 2×10^5 Pa, 粘结半径为 3.8 mm。立式螺旋耕刀模型通过 CREO 建立并导入到 EDEM。仿真参数^[21-22] 如表 2 所示。

表 2 离散元仿真参数

Tab.2 Particle parameters of soil and root

参数	数值	参数	数值
土壤密度/(kg·m ⁻³)	1 640	土壤-土壤恢复系数	0.6
土壤泊松比	0.3	土壤-土壤静摩擦因数	0.35
土壤剪切模量/Pa	1×10^6	土壤-土壤动摩擦因数	0.21
根系密度/(kg·m ⁻³)	107.6	根系-根系恢复系数	1
根系泊松比	0.33	根系-根系静摩擦因数	1
根系剪切模量/Pa	2.79×10^7	根系-根系动摩擦因数	0
16Mn 密度/(kg·m ⁻³)	7.85×10^3	土壤-根系恢复系数	0.6
16Mn 泊松比	0.31	土壤-根系静摩擦因数	0.573
16Mn 剪切模量/Pa	2.12×10^{11}	土壤-根系动摩擦因数	0.21
16Mn-土壤恢复系数	0.6	16Mn-根系恢复系数	0.6
16Mn-土壤静摩擦因数	0.311	16Mn-根系静摩擦因数	0.51
16Mn-土壤动摩擦因数	0.28	16Mn-根系动摩擦因数	0.02

根据根系剪切试验可知飞蓬的剪切力最大, 因此以飞蓬根系作为离散元根系模型, 建立的根土复合体模型及真实根系如图 6 所示。

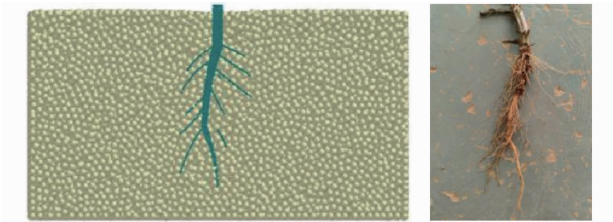


图 6 根土复合体模型及真实根系

Fig.6 Model of root-soil composite and real root

3.2 仿真模型验证

为确保离散元模型的有效性, 需要进行仿真模型验证, 建立仿真与实际对比试验。根系模型验证采用剪切试验, 土壤模型验证采用坚实度试验, 如图 7 所示。实际剪切试验采用静态应变仪和万能试验机完成, 切刀下行速度为 10 mm/s, 记录最大剪切力; 坚实度试验采用土壤坚实度仪测量, 金属探头下行速度为 25 mm/s, 仪器可自动记录最大值。

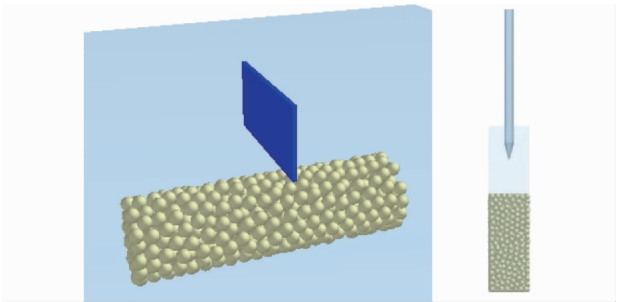


图 7 仿真剪切试验与坚实度试验

Fig.7 Simulated shear experiment and solidity experiment

试验结果表明, 实际剪切试验中记录的最大剪切力为 214 N, 仿真剪切试验中切刀最大受力为 225.7 N, 仿真比实际试验剪切力高 5.47%; 实际坚实度试验中, 土壤坚实度仪记录的最大值为 231 N, 仿真坚实度试验中金属探头最大受力为 223.3 N, 仿真比实际测量的最大值低 3.14%。对比仿真和实际试验, 二者差异在合理范围内, 可使用该模型进行仿真试验分析。

3.3 刀具参数仿真优化

仿真优化参数有 α 、 β 、 γ 、 R_1 和 p , 参数 R_2 前文已确定为 51 mm。以上述所得各参数的值为基础, 进行最陡爬坡试验, 进一步确定各参数的取值范围。最陡爬坡试验设计与结果如表 3 所示。

表 3 最陡爬坡试验设计与结果

Tab.3 Design and results of steepest climbing experiment

试验 序号	因素					转矩/ (N·m)
	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	$\gamma/(^\circ)$	R_1/mm	p/mm	
1	12	30	30	40	35	41.1
2	10	25	25	45	40	37.0
3	8	20	20	50	45	59.2
4	6	15	15	55	50	62.1

由表 3 可知, 转矩最小值在试验 1 ~ 试验 3 内出现, 则以参数 $\alpha(8^\circ \sim 12^\circ)$ 、 $\beta(20^\circ \sim 30^\circ)$ 、 $\gamma(20^\circ \sim 30^\circ)$ 、 $R_1(40 \sim 50 \text{ mm})$ 、 $p(35 \sim 45 \text{ mm})$ 为影响因素, 以耕刀最大工作转矩 M 为评价指标进行五因素一次回归正交试验。仿真过程中, 根据余摆线要求, 螺旋耕刀转速设置为 200 r/min, 前进速度为 0.03 m/s, 试验设计与结果如表 4 所示。

表 4 刀具参数优化试验设计与结果
Tab.4 Design and results of parameter optimization for cutter

试验 序号	因素					M/ (N·m)
	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$\gamma/(^{\circ})$	R_1/mm	p/mm	
1	10	25	25	45	40	47.6
2	12	30	20	40	45	38.5
3	8	30	20	40	35	48.4
4	12	30	20	50	35	47.7
5	12	20	20	50	45	60.7
6	8	30	20	50	45	62.0
7	10	25	25	45	40	48.5
8	10	25	25	45	40	47.9
9	12	20	30	50	35	64.2
10	12	30	30	40	35	37.5
11	8	20	20	40	45	42.2
12	8	30	30	40	45	43.9
13	12	20	20	40	35	43.5
14	12	30	30	50	45	35.2
15	12	20	30	40	45	57.8
16	8	20	30	50	45	46.9
17	8	30	30	50	35	51.0
18	8	20	20	50	35	45.1
19	8	20	30	40	35	40.8

为了降低耕刀功耗,以耕刀受到的最大转矩为响应值建立回归方程

$$M = -470.61184 + 14.7435\alpha + 11.05\beta + 7.3225\gamma + 4.155R_1 + 5.4575p + 0.61\alpha\beta + 0.12125\alpha\gamma + 0.005\alpha R_1 - 0.065\alpha p - 0.118\beta\gamma - 0.0125\beta R_1 - 0.0475\beta p - 0.064\gamma R_1 - 0.071\beta p - 0.0385pR_1 \quad (12)$$

回归模型的 P 值小于 0.01,模型极显著,模型决定系数 R^2 和校正决定系数 R^2_{adj} 分别为 0.999 6 和 0.997 6,失拟项不显著,模型可靠度高。以 M 值最小为目标,运用 Design-Expert 求解模块获得一组优化参数组合: α 为 12° 、 β 为 30° 、 γ 为 30° 、 R_1 为 40 mm 和 p 为 40 mm,此时耕刀最大工作转矩模型预测值为 34.92 N·m。

3.4 仿真分析

将螺旋耕刀的参数设置为优化后的参数,在转速为 200 r/min,前进速度为 0.03 m/s 条件下,再次进行耕作仿真试验,用于对回归模型进行验证,同时获取耕刀对土壤及根系的扰动情况,以分析优化后耕刀的耕作效果。

3.4.1 工作转矩

螺旋耕刀在完全入土后转矩的变化曲线如图 8 所示。耕刀切削根土复合体时,最大转矩为 36.64 N·m,与回归模型的预测值 34.92 N·m 相比,

二者相对误差为 4.69%,检验了回归模型的准确性。由 $P = Tn/9550$ 可进一步计算出所设计的螺旋耕刀功耗为 0.77 kW。

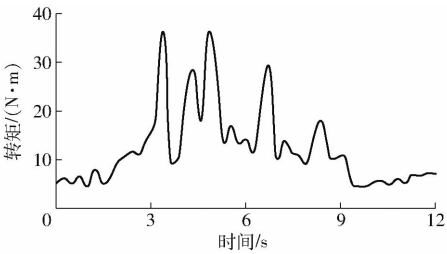


图 8 切削根土复合体时转矩变化曲线
Fig.8 Variation curve of cutting torque during cutting of root-soil composite

3.4.2 土壤与根系运动情况

如图 9 所示,在土壤上、中、下 3 层随机各选取一土壤颗粒,观察其耕作前与耕作后的位置变化。位移变化情况如图 10 所示,上、中、下 3 层的颗粒最终都会被带至土壤最高平面,较小的差异存在是因为抛土形成了土堆,颗粒处于小土堆的位置不同。图中 3 个颗粒上升曲线的斜率一致,说明优化后的螺旋耕刀翻松土壤均匀性好。

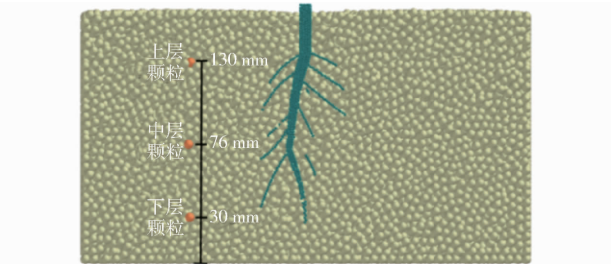


图 9 颗粒位置示意图
Fig.9 Schematic of particle location

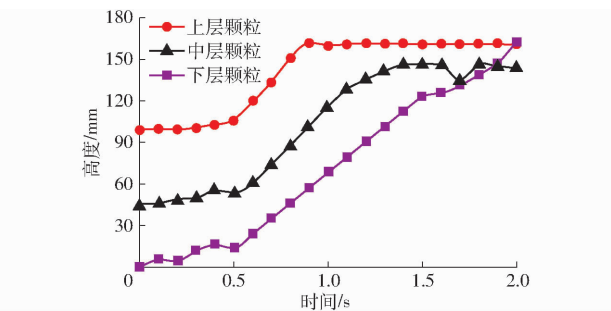


图 10 颗粒位置变化曲线
Fig.10 Variation curves of position of particle

3.4.3 土壤与根系的扰动情况

土壤及根系的扰动情况可通过耕作后粘结键的断裂情况反映。仿真根土复合体体积为 350 mm × 200 mm × 200 mm,螺旋耕刀扰动体积为 350 mm × 160 mm × 190 mm。根土复合体模型中包含 117 498 个土壤粘结键和 4 911 个根系粘结键,其中扰动体积内土壤粘结键有 89 298 个。经螺旋耕刀耕作后,

土壤粘结键数量减少 82 582 个,断键率为 92.48%;根系粘结键数量减少 3 534 个,断键率为 71.96%。结果表明优化后的耕刀对根土复合体的扰动率可达到 91.41%。

4 螺旋耕刀土槽试验

为了检验优化后耕刀的耕作效果以及验证仿真的有效性,加工出螺旋耕刀样件进行土槽耕作试验,获取并分析试验结果。

4.1 试验台架

将加工好的螺旋耕刀安装在三轴试验平台上,如图 11 所示。试验平台由 3 台导轨驱动电机和 1 台耕刀驱动电机、螺旋耕刀、土槽、机架及传动装置等组成。3 台导轨驱动电机用于驱动螺旋耕刀在 X、Y、Z 轴方向上移动;耕刀驱动电机给螺旋耕刀提供动力使之旋转。通过单片机控制 4 台电机,进而控制螺旋耕刀的前进速度和旋转速度。



图 11 三轴试验平台及耕刀

Fig. 11 Triaxial test platform and vertical spiral cutter

1. Z 轴导轨 2. Y 轴导轨 3. X 轴导轨 4. 耕刀驱动电机 5. 立式螺旋耕刀 6. 根土复合体 7. 土槽 8. 万向轮

4.2 试验条件及方法

试验根土复合体的取样:首先在试验油茶林中选取合适根土复合体,进行土壤坚实度测试,然后挖出 300 mm×200 mm×200 mm 的根土复合体迁移至土槽中,试验前将根土复合体与土槽中的土壤进行压实处理,使得根土复合体整体不移动,保证试验的顺利开展。为保证与仿真过程条件一致,试验过程中将螺旋耕刀旋转速度设置为 200 r/min,前进速度设置为 0.03 m/s。

耕深:利用直尺插入耕作后的土壤,测量底部未耕土壤面与原土壤面的距离。螺旋耕刀入土深度设定为 15 cm,在耕作路径上随机取 5 点(去除开始和结束阶段)测量实际深度,实际耕深与设定入土深度的比值即为该点的耕深稳定性系数。

碎土效果:在耕作后的路径中随机取 5 个 0.1 m×0.1 m 的土壤进行检测称量,检测高度为 150 mm,拾取出称量土壤中最长边大于 2 cm 的土块,对余下土壤进行称量。余下土壤占总称量土壤

质量的百分比为该检测区的碎土率,5 个检测区域碎土率的平均值为总碎土率。

除根效果:在耕作过程中,螺旋耕刀将路径上的草和灌的根系切断或带出土壤即视为除根成功,除根率为除根成功的根系数量占耕作前根系总数的百分比。

转矩:计算机连接三轴控制器,使用云控监测电机电压和电流,反复试验获取电机驱动效率为 79.69%,最终获得耕刀的消耗功率,再通过公式 $T=9\,550P/n$ 获得转矩,继而与仿真结果进行对比。

4.3 试验结果与分析

耕作路径上随机取 5 点,其耕深稳定性系数分别为 90.33%、92.67%、94.01%、91.67%、93.03%,取平均值得到耕深稳定性系数为 92.34%,平均耕深为 13.85 cm,满足耕作要求。

5 个检测区的碎土率分别为 95.33%、95.49%、94.44%、95.09%、94.67%,平均碎土率为 95.00%,满足耕作要求。

检查耕作路径并深挖试验后土壤,结果表明土壤中只剩少许根须,计算后得除根率为 95.3%,满足耕作要求。

图 12 为耕刀试验中的转矩变化曲线。对比图 8 与图 12 可知,螺旋耕刀试验转矩与仿真转矩都呈现出在一定范围内波动的趋势,试验中螺旋耕刀切削土壤时最大转矩为 7.11 N·m,切削根系时最大转矩为 34.84 N·m;仿真中螺旋耕刀切削土壤时最大转矩为 7.61 N·m,切削根系时最大转矩为 36.64 N·m,两者数据相近,切削土壤和切削根系的相对误差分别为 6.57% 和 4.91%。经分析产生差异的主要原因有:实际土壤和仿真土壤模型之间存在一定差异;根土复合体模型建立过程中对根系情况进行了简化,而实际的根土复合体中根系情况较为复杂。仿真与试验结果的对比分析也说明了螺旋耕刀设计的正确性。

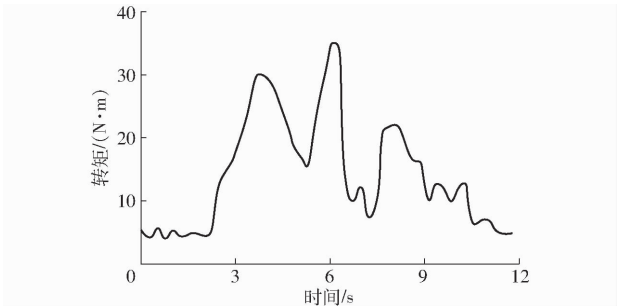


图 12 耕刀试验转矩变化曲线

Fig. 12 Variation of torque in plow blade test

5 结论

(1)设计了松土除草机,该机的耕刀采用立式

螺旋耕刀,单把刀具的螺旋叶片直径为 150 mm,高度为 150 mm,厚度为 3 mm,内基圆半径 R_2 为 51 mm。经过优化后螺距为 40 mm、外基圆弧角 α 为 12° 、切削刃轮廓线包络角 β 为 30° 、内基圆弧角 γ 为 30° 、切削刃轮廓线半径 R_1 为 40 mm。

(2) 仿真结果表明:优化后螺旋耕刀可将土壤翻松,翻松均匀性好,对根土复合体的扰动率可达到 91.41%。优化后螺旋耕刀在松土时最大切削阻力为 179.65 N,最大功率消耗为 0.16 kW;刀具切削根土复合体时最大切削阻力为 537.97 N,最大功率消

耗为 0.77 kW,与功耗优化模型预测值相差 4.69%。

(3) 土槽试验表明,设计的螺旋耕刀耕深平均值为 13.85 cm,耕深稳定性系数为 92.34%,碎土率平均值为 95.00%,除根率为 95.30%,可达到相应的农艺作业需求;切削土壤时,实际测得的最大功率消耗值比仿真值低 6.57%,切削根土复合体时,实际测得的最大功率消耗值比仿真值低 4.91%,两者比较接近。结合仿真分析和土槽试验,结果表明所设计的立式螺旋松土除草机具有良好的性能,能够满足松土、除草、除灌的耕作要求。

参 考 文 献

[1] 赖鹏英,肖志红,李培旺,等. 油茶资源利用及产业发展现状[J]. 生物质化学工程, 2021, 55(1): 23-30.
LAI Pengying, XIAO Zhihong, LI Peiwan, et al. Research on utilization of *Camellia oleifera* abel. resources and industrial development status[J]. Biomass Chemical Engineering, 2021, 55(1): 23-30. (in Chinese)

[2] ZHANG P, WEI T, JIA Z, et al. Effects of straw incorporation on soil organic matter and soil water-stable aggregates content in semiarid regions of Northwest China[J]. PLoS One, 2014, 9(3): e92839.

[3] 何志祥. 油茶树体调控模式与技术的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
HE Zhixiang. The regulation patterns and technology of tree structure in *Camellia oleifera* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013. (in Chinese)

[4] 刘小燕,王毅,叶苗. 油茶低产林改造技术研究[J]. 中国林副特产,2023(1): 34-36.
LIU Xiaoyan, WANG Yi, YE Miao. Study on reconstruction technology of *Camellia oleifera* abel. low-yield forest[J]. Forest by-Product and Speciality in China, 2023(1): 34-36. (in Chinese)

[5] 祁兆鑫,余冬梅,刘亚斌,等. 寒旱环境盐生植物根-土复合体抗剪强度影响因素试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1438-1448.
QI Zhaoxin, YU Dongmei, LIU Yabin, et al. Experimental research on factors affecting shear strength of halophyte root-soil composite systems in cold and arid environments [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6): 1438-1448. (in Chinese)

[6] 吕金庆,刘齐卉,李紫辉,等. 犁铧式马铃薯中耕机培土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 71-82.
LÜ Jinqing, LIU Qihui, LI Zihui, et al. Design and experiment of soil cultivating device of plowshare potato field cultivator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 71-82. (in Chinese)

[7] 李亚丽,曹中华,湛小梅,等. 果园凿型铲式深松机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 19-25.
LI Yali, CAO Zhonghua, ZHAN Xiaomei, et al. Optimal design and test of orchard chisel-type shovel subsoiler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 19-25. (in Chinese)

[8] 梁方,王德成,尤泳,等. 草地切根施肥补播复式改良机设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(1): 231-241.
LIANG Fang, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Design and experiment of root-cutter with fertilization and reseeding compound remediation machine for grassland [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(1): 231-241. (in Chinese)

[9] 张学宁,尤泳,王德成,等. 基于离散元法的板结草地破土切根刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2022, 53(11): 176-187.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Design and experiment of soil-breaking and root-cutting cutter based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 176-187. (in Chinese)

[10] 朱惠斌,吴宪,白丽珍,等. 基于 EDEM-ADAMS 仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 10-22.
ZHU Huibin, WU Xian, BAI Lizhen, et al. Development of the biaxial stubble breaking no-tillage device for rice stubble field based on EDEM-ADAMS simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(19): 10-22. (in Chinese)

[11] RAVSHANOV H. Parameters of the furrow cutter with levellers of the combined machine[C]//E3S Web of Conferences. EDP Science, 2023: 390.

[12] ALIAKBAR S, JOHN M F J, JACKY M A D, et al. Soil translocation by narrow openers with various bent leg geometries[J]. Biosystems Engineering, 2014, 127: 41-49.

[13] 赵淑红,高连龙,袁溢文,等. 基于离散元法的深松作业玉米秸秆运动规律[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 53-62.
ZHAO Shuhong, GAO Lianlong, YUAN Yiwen, et al. Maize straw motion law in subsoiling operation using discrete element

method[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 53–62. (in Chinese)

[14] 丁兆军, 白洋. 根系发育和微生物组研究现状及未来发展趋势[J]. 中国科学:生命科学, 2021, 51(10): 1447–1456. DING Zhaojun, BAI Yang. The current and future studies on plant root development and root microbiota[J]. Science China: Life Sciences, 2021, 51(10): 1447–1456. (in Chinese)

[15] 王金武, 关睿, 高鹏翔, 等. 胡萝卜联合收获机单圆盘对顶切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 73–81. WANG Jinwu, GUAN Rui, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of single disc to top cutting device for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 73–81. (in Chinese)

[16] 陈平录, 许静, 翟因敏, 等. 丘陵山区低矮树型果园立式微耕机的设计与试验[J]. 机械设计与制造, 2021(2): 299–303. CHEN Pinglu, XU Jing, ZHAI Yinmin, et al. Design and experimental study of vertical micro-cultivator for low trees in hilly orchard[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(2): 299–303. (in Chinese)

[17] MARIEM A, CHRISTIAN F, TINO D, et al. Parameterising wheat leaf and tiller dynamics for faithful reconstruction of wheat plants by structural plant models[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 213–230.

[18] 邓佳玉. 基于离散元法的深松铲耕作阻力的仿真与试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015. DENG Jiayu. Simulation and experimental study of the subsoiler tillage resistance based on discrete element method[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[19] 李云伍, 张国勇, 张植, 等. 低功耗小型立轴式深耕机分段螺旋旋耕刀具的研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 72–80. LI Yunwu, ZHANG Guoyong, ZHANG Zhi, et al. Development of low power-consumption multi-helical rotavator for small vertical-shaft deep-cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 72–80. (in Chinese)

[20] 陈金楚, 奚小波, 殷慧子, 等. 基于 EDEM–Fluent 耦合的气爆松土效果仿真分析[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(3): 70–79. CHEN Jinchu, XI Xiaobo, YIN Huizi, et al. Simulation analysis and gas explosion loosening soil effect based on EDEM–Fluent coupling[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(3): 70–79. (in Chinese)

[21] 刘俊安. 基于离散元方法的深松铲参数优化及松土综合效应研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. LIU Jun'an. Study on subsoiler parameters optimization and comprehensive effect of subsoiling based on the discrete element method[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[22] 赵淑红, 刘汉朋, 杨超, 等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 75–87. ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, YANG Chao, et al. Design and discrete element simulation of interactive layered subsoiler with maize straw returned to field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75–87. (in Chinese)

(上接第 57 页)

[19] 胡双燕, 胡敏娟, 张文毅, 等. 辣椒穴盘苗茎秆力学特性试验与仿真研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(3): 9–18. HU Shuangyan, HU Minjuan, ZHANG Wenyi, et al. Experimental and simulation study on mechanical properties of stem of pepper hole seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(3): 9–18. (in Chinese)

[20] 马晓晓, 李华, 葛云, 等. 番茄钵苗茎秆力学特性试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(8): 161–167. MA Xiaoxiao, LI Hua, GE Yun, et al. Experimental study on mechanical properties of tomato seedling stem[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8): 161–167. (in Chinese)

[21] 刘晓东, 王春光, 郭文斌, 等. 甜高粱弯曲力学特性试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(7): 180–185. LIU Xiaodong, WANG Chunguang, GUO Wenbin, et al. Experiments on bending mechanical properties of sweet sorghum[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(7): 180–185. (in Chinese)

[22] 马国鑫. 生物炭苗钵低损取苗增强机理与气顶-包裹夹取式取苗机构研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021. MA Guoxin. Study on enhancement mechanism of low loss seedling picking in biochar and air ejection-package clamping pick-up device[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[23] 童俊华, 石虎峰, 武传宇, 等. 穴盘移栽指铲式末端执行器苗钵基质抓取仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 107–116. TONG Junhua, SHI Hufeng, WU Chuanyu, et al. Simulation and test of seedling pot grabbing by spade end-effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 107–116. (in Chinese)