

蔡宗寿, 郎太恩, 张昊晗, 等. 自走式林下三七收获机设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(6): 752-760.

CAI Zongshou, LANG Tai en, ZHAN Haohan, et al. Design and experiment of self-propelled harvester for forest understory panax pseudoginseng[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(6): 752-760.

自走式林下三七收获机设计与试验

蔡宗寿¹, 郎太恩¹, 张昊晗², 李兴成¹, 薛景¹, 王文均¹, 王一博¹, 徐亮¹

(1. 云南农业大学机电工程学院, 昆明 650201; 2. 云南开放大学机电工程学院, 昆明 650500)

摘要: 针对云南中草药林下三七人工收获难度大及无机械收获等问题, 设计了一种以9.6 kW单缸风冷柴油机为动力自走式林下三七收获机, 由发动机、挖掘铲、升运筛等组成。用受力分析与图解法对挖掘铲进行分析, 确定挖掘铲的挖掘倾角 20° , 铲长305 mm。对输送分离装置进行设计计算, 确定了升运筛的设计参数, 升运筛线速度 $1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 升运倾角 30° , 抖动轮振幅2 mm、转速 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、抖动频率10 Hz。以挖掘铲齿数、工作速度和挖掘铲入土角为影响因素, 利用EDEM离散元仿真软件, 挖掘铲挖掘过程中所受阻力为试验指标, 进行三因素三水平正交仿真试验。用Design-expert分析处理, 得到挖掘铲最优参数组合: 铲齿数6、工作速度 $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、入土角 25° 。对样机进行试验, 试验表明: 样机作业稳定, 达到了收获机初步设计的作业性能, 挖掘铲破土性能较好, 伤根率和损失率较低, 收获生产率为 $0.149\text{ hm}^2\cdot\text{h}^{-1}$ 。

关键词: 自走式; 挖掘铲; 三七收获机; EDEM

中图分类号: S225

文章编号: 1000-1700(2024)06-0752-09

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Experiment of Self-propelled Harvester for Forest Understory Panax Pseudoginseng

CAI Zongshou¹, LANG Tai en¹, ZHAN Haohan², LI Xingcheng¹, XUE Jing¹,
WANG Wenjun¹, WANG Yibo¹, XU Liang¹

(1. College of Electrical and Mechanical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. College of Electrical and Mechanical Engineering, Yunnan Open University, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the difficulties of manual harvesting and the lack of mechanical harvesting of Yunnan understory panax pseudoginseng (*Panax pseudoginseng*), a self-propelled understory panax pseudoginseng harvesting machine powered by a 9.6 kW single-cylinder air-cooled diesel engine was designed, which mainly consists of an engine, a digging shovel, and a lifting sieve, and so on. The force analysis and graphical method were used to analyze the digging shovel, and the digging inclination angle of the shovel was determined to be 20° , and the shovel length was 305 mm. The design parameters of the lifting sieve were determined through design and calculation of the conveying and separating device, and the linear speed of the lifting sieve was $1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the lifting inclination angle was 30° , and the amplitude of the shaking wheel was 2 mm, the rotational speed was $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, and the frequency of the shaking wheel was 10 Hz. Taking the number of teeth of digging shovel, working speed, penetrating angle of digging shovel as the influencing factors, the to simulate the size of the resistance of the digging shovel as the test index, the three factors and three levels orthogonal tests were carried out using EDEM discrete element simulation software and analyzed using Design-expert. And the optimal parameter combinations of the digging shovel are obtained that the number of shovel teeth is 6, the working speed is $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and the penetrating angle of the digging shovel is 25° . The prototype of the harvester was developed and trial testing was

收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 云南省重大科技专项(202102AE090042); 云南省马铃薯全程机械化生产示范项目(202206)

第一作者: 蔡宗寿(1970-), 男, 硕士, 副教授, 从事农业机械装备研究, E-mail: 847433071@qq.com

carried out. The results showed that the prototype operation is stable, and the operational performance can satisfy the preliminary design requirement of the harvester, the digging shovel has a better soil breaking performance, the harvester has a lower root injury rate and lower loss, the harvesting productivity is $0.149 \text{ hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$.

Key words: self-propelled; digging shovel; panax pseudoginseng harvester; EDEM

三七是名贵的中药材,属于五加科人参植物^[1]。三七主要有大田、温室和林下3种植模式。目前云南农田耕地面积500万 hm^2 ,林地的面积为2000万 hm^2 ^[2],有近600万 hm^2 适合林下三七种植,把三七从农田移到林下,不仅使农田被占用的问题得到解决,还能使三七产业得到更好的发展。林下三七种植模式将是三七产业的发展趋势。目前,林下三七收获完全采用人工收获方式,人工收获三七劳动强度大,收净率低,严重制约了林下三七的发展。实现林下三七收获机械化,不但可以提高生产效率^[3],还可以推进林下药材收获机械的发展。

我国对中药材收获机械的研究起步较晚^[4],林下三七收获机械可以借鉴有块茎类的马铃薯、胡萝卜、甜菜、元胡、平贝母、半夏、花生等农作物收获^[5-7],但此类作物收获机不适合林下三七收获的要求,原因为:(1)马铃薯、胡萝卜、甜菜、花生收获机,由于分离尺寸和挖掘深度较大,对于密度较大的三七不适合^[8-10];(2)平贝母、半夏、元胡和三七的块茎大小、形状相似,但收获方式和种植环境不同,也不适合林下三七的收获^[11]。由于林下三七特殊的种植环境,绝大多数根茎收获机都无法适应林下三七种植环境,因此研究开发一种自走式林下三七收获机势在必行的,不仅可以提高收获效率,降低劳动强度,还能推动林下三七产业的机械化发展,为云南中草药经济的发展做出重要贡献。

1 林下三七种植农艺要求

选择昆明市寻甸县林下三七种植基地,采用五点法各取20株三七分别对根长、根宽、根深等参数进行测量,得到林下三七相关种植农艺参数如表1。

表1 林下三七种植农艺参数

Table 1 Agronomic parameters for planting panax notoginseng under forest

参数 Parameter	分布范围 Range	均值 Average value
垄顶宽 Ridge top width /mm	980 ~ 1 300	1 250
垄底宽 Ridge bottom width /mm	1 500 ~ 1 820	1 720
垄高 Ridge height /mm	250 ~ 300	270
行距 Row spacing /mm	101 ~ 191	149.6
株距 Hill spacing /mm	115 ~ 151	135.2
三七根长 Panax notoginseng root length /mm	78 ~ 210	131.5
三七根宽 Panax notoginseng root width /mm	22 ~ 41	30.5
三七根深 Panax notoginseng root depth /mm	113 ~ 148	132.1

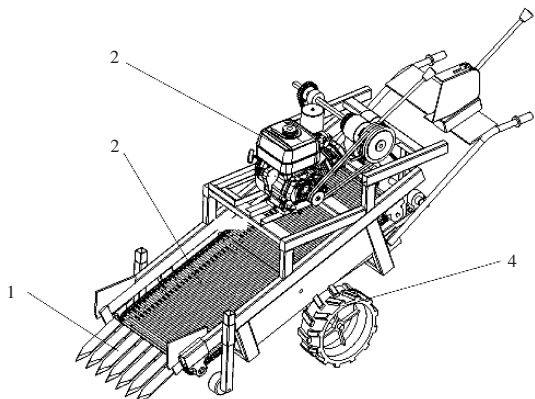
2 整机结构及工作原理

2.1 林下三七收获机整体结构

根据云南林下三七种植农艺要求,设计一款自走式林下三七收获机,整机结构如图1。由挖掘装置、输送分离装置、动力装置、行走装置等组成。其特点是挖掘装置前置,行走轮不会压损三七根茎,一次完成挖掘、分离作业。该机具工作可靠,操作简单。

2.2 工作原理及主要技术参数

在进行林下三七根茎收获之前,要先将三七垄面以上的三七茎秆切除。工作时收获机通过柴油机经皮带轮将动力传递到减速器上,再由减速器上的传动轴通过链传动传递给主动轮和升运筛主动链轮带动机器工作。挖掘铲将三七块根挖起来,经过挖掘铲后端的升运筛输送,升运筛中间部位设有抖动轮将挖起来的三七块根和土壤混合物通过抖动轮抖动进行分离,实现三七块根和土壤混合物分离达到去土的效果,再经升运筛运送到收获机的末端掉落在垄面上再由人工捡拾分离好的三七块根,完成挖掘、输送分离等工作。整机主要技术参数见表2。



1. 挖掘装置;2. 输送分离装置;3. 发动机;4. 行走轮
1. Excavating device; 2. Conveying and separating device; 3. Engine; 4. Travelling wheels

图1 林下三七收获机结构

Figure 1 Structure of forest panax pseudoginseng harvester

表2 自走式林下三七收获机主要参数
Table 2 Main parameters of Self-propelled forest understory panax pseudoginseng harvester

参数 Parametric	数值 Numerical value
外形尺寸(长×宽×高)/mm Overall dimensions (L×W×H)	2 100×800×1 400
发动机功率/kW Engine power	9.6
工作幅宽/mm Working width	700
挖掘深度/mm Digging depth	150 ~ 200
整机质量/kg Overall weight	280

3 关键部件设计与参数计算

3.1 挖掘铲的设计

由于林下三七植株密度很大,而且部分三七的筋条和须根很长,为了保证挖净三七,减少漏挖率,减小入土阻力,本设计采用平面铲图2。挖掘铲设计时主要考虑的参数有:铲体长度 L 、铲体宽度 B 、铲刃夹角 θ (图3)。挖掘铲受力简图如图4。

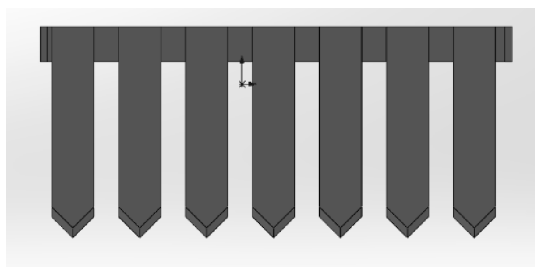


图2 挖掘铲三维模型

Figure 2 Digging shovel 3D model

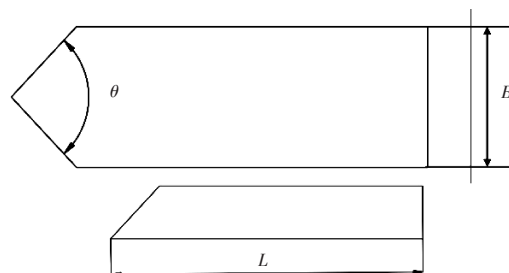


图3 挖掘铲单铲的结构参数

Figure 3 Structural parameters of digging shovel

3.1.1 铲体长度 L 挖掘铲长度与三七块根的生长深度和挖掘铲的入土角有关。由图4三七和土壤混合物在挖掘铲上受力分析可以得出挖掘铲入土角 α 的大小会直接影响挖掘铲的工作阻力。为了保证挖掘铲能在不损伤三七块根的前提下,将三七块根从土里挖掘出来,挖掘铲的挖掘深度要大于三七块根的最大生长深度。挖掘铲的长度、工作深度与挖掘入土角的关系为:

$$L = \frac{H}{\sin\alpha} \quad (1)$$

式中: H 为挖掘铲挖掘深度(mm); L 为挖掘铲铲长(mm); α 为挖掘铲入土角($^\circ$)。

由表1可知,林下三七最大根深148 mm。挖掘铲的挖掘深度需大于三七块根生长最深深度,所以设挖掘铲的挖掘深度 $H=150$ mm,通过查资料可得根茎类收获机挖掘铲的相关设计理论,挖掘铲入土角 α 在 $15^\circ \sim 30^\circ$ [12]。入土角越小挖掘铲入土行程越大,收获机工作一段时间才能到达指定的挖掘深度,这个过程挖掘铲会损伤三七根茎。所以为了减小入土行程,入土角取 $\alpha=30^\circ$, $H=150$ mm,代入式

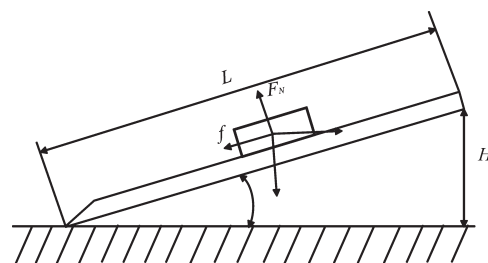


图4 挖掘铲上三七和土壤混合物受力分析

Figure 4 Stress analysis of panax notoginseng and soil mixture on excavation shovel

(1)得 $L=300$ mm,实际挖掘长度要略大于理论长度,因此本设计挖掘铲铲长为305 mm。

3.1.2 铲体宽度 B 挖掘铲的铲体宽度的设计要根据林下三七种植根块地下行株距。收获机在进行挖掘三七过程中,三七块根应保持在挖掘铲上,减小对三七块根的损伤以及出现三七块根从挖掘铲间隙漏出等问题。挖掘铲铲体宽度为 B ,两铲间隙为 A ,三七株距为 C 。为防止三七块根从挖掘铲两铲间隙漏出的问题挖掘铲两铲间隙要小于三七块根最小宽度,由表1可知,三七块根最小宽度22 mm,因此挖掘铲两铲间隙取 $A=20$ mm。结合表1林下三七平均株距135.2 mm,将 $C=135.2$ mm, $A=20$ mm代入式 $c \leq a+2B$,可得 $B \geq 57.6$ mm,该收获机作业幅宽为700 mm,6铲片总的间隙120 mm,计算得 $B=82.8$ mm,实际挖掘宽度要略大于理论值,所以单铲宽度 B 取83 mm。

3.1.3 挖掘铲铲刃夹角 θ 合适挖掘铲的铲刃夹角是掘起三七根茎与土壤混合物的前提。在进行收获作业时,挖掘铲要全部插入土壤将三七根和土壤掘起。杂草沿着挖掘铲铲刃滑离,防止产生堵塞。对挖掘铲铲刃上的土壤混合物进行的受力分析如图5。

铲刃夹角 θ 要使杂草滑离,则必须满足以下条件:

$$\begin{cases} P \cos \frac{\theta}{2} \geq F_1 \\ P \sin \frac{\theta}{2} = F_2 \\ F_1 = \mu F_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 为土壤对铲刃的阻力(N); F_1 为铲刃对土壤的摩擦力(N); F_2 为铲刃对土壤的支持力(N); μ 为土壤与钢间的摩擦系数, $\mu=\tan\varphi$, φ 为土壤与挖掘铲的摩擦角($^\circ$)。

由式(2)化简得:

$$\frac{\theta}{2} \leq 90^\circ - \varphi \quad (3)$$

通过查资料可知,挖掘铲的铲刃夹角 θ 在 $75 \sim 120^\circ$ 范围合适^[13]。

由式(3)可知,当 θ 角过小时,要达到同样的挖掘宽度,就必须增加挖掘铲的长度,这样会增加机具的损失率和损伤率^[14]。当 θ 角过小时,杂草不会被切断会引起堵塞。土壤与钢的摩擦系数为 $\mu=\tan\varphi=0.85 \sim 0.9$ ^[15],则 $\varphi=40.4 \sim 42^\circ$,则 θ 的取值应 $\leq 96^\circ$,本研究取挖掘铲铲刃夹角为 90° ,满足设计要求。完成挖掘铲的加工,挖掘铲材料选用45#钢,并进行热处理。

3.2 输送分离装置的设计

3.2.1 升运筛参数确定 升运筛是将三七块根与土壤混合物分离的关键部件,三七块根的收净率和伤根率是由升运筛运动来决定的。要确保杆条式升运筛达到去土效果并保证三七根块不从杆条间隙掉下,应使杆间间隙小于三七根块最小直径 A ,也就是保证块茎的最小尺寸大于杆条间隙。根据表1林下三七块根最小尺寸22 mm,综合以上因素,得杆条间距20 mm,为保证杆条强度和稳定性,杆条直径 $D10$ mm。升运筛工作宽度700 mm,长度1500 mm。输送分离装置如图6。

3.2.2 升运筛线速度计算 输送装置在工作时,为减小对三七块根的损伤,同时避免壅土,其线速度与机器前进速度要有正确的配比关系^[16]。若机器前进速度为 V_p ,输送分离装置线速度为 V_{r1} ,则有:

$$\lambda = \frac{V_{r1}}{V_p} \quad (4)$$

式中: λ 为速度系数,块茎类作物收获机输送装置线速度一般取为收获速度的 $0.8 \sim 2.5$ 倍^[17],所以 λ 取值一般为 $0.8 \sim 2.5$ 。为确保林下三七收获机能获得较高的生产率和较好的收获质量,其速度一般为 $0.6 \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,取速度系数 $\lambda=1.5$,则运筛线速度取值范围为 $0.9 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,考虑到要在林下特殊环境作业,收获机工作速度 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,为了保证挖掘起来的三七和土壤混合物顺畅通过,设计输送分离装置线速度为 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.2.3 升运倾角的确定 三七根土混合物在升运筛上运动受力分析如图7,其受力包括根土混合物本身的重力 G 、升运筛对根土混合物的支撑力 F_N 、升运筛杆条与三七根土混合物之间的摩擦力 f 。

三七根土混合物沿着升运筛筛面向后的运动受力为:

$$\begin{cases} F_N = mg \cos \rho \\ F_x = f - mg \sin \rho = ma \\ f = \mu F_N \end{cases} \quad (5)$$

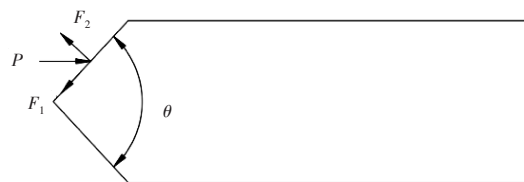
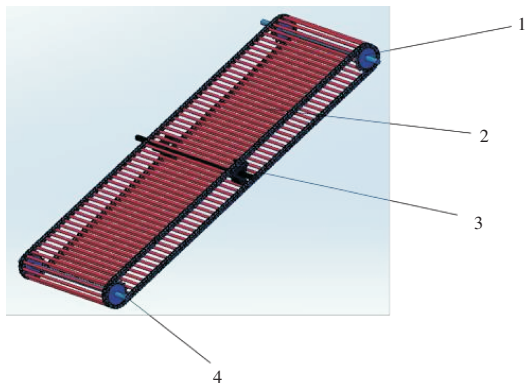


图5 土壤在铲刃上受力分析示意图

Figure 5 Schematic diagram of force analysis of soil on shovel blade

式中： F_N 为三七根土混合物对升运筛的压力(N)； m 为三七根土混合物质量(kg)； ρ 为升运筛的安装倾角($^\circ$)； g 为重力加速度($m \cdot s^{-1}$)； F_x 为三七根土混合物受到升运筛线速度方向上的合力(N)； F 为三七根土混合物和升运筛杆条之间的摩擦力(N)； a 为竖直方向上的加速度($m \cdot s^{-1}$)； μ 为三七根土混合物与升运筛杆条之间的静摩擦因素，取0.6。



1.驱动轮;2.升运筛;3.抖动轮;4.支撑链轮
1. Drive wheel; 2. Lifting screen; 3. Shaking wheel; 4. Support sprocket

图6 输送分离装置三维模型

Figure 6 Structural diagram of lifting screen

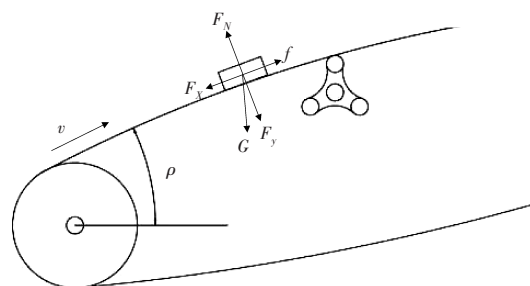


图7 三七根土混合物受力分析

Figure 7 Force analysis of panax notoginseng root-soil mixtures

由式(5)转化可得：

$$a = g(\mu \cos \rho - \sin \rho) \geq 0 \tag{6}$$

在收获过程中，三七根土混合物经过抖动轮抖动后被输送到收获机的后方，此时三七根茎在速度方向上的合力应该与升运筛的线速度方向是一致的，则：

$$a = g(\mu \cos \rho - \sin \rho) > 0 \tag{7}$$

代入数据计算得升运筛的升运倾角 $\rho < 31^\circ$ ，通常杆条式升运筛倾角的取值范围 $20 \sim 30^\circ$ ，本设计升运筛倾角取 30° 。

3.2.4 抖动轮的设计 抖动轮是使升运链振动的关键部件。针对云南林下三七种植的地理环境，选用较稳定的三头型抖动轮对分离三七块根和土壤混合物有良好的振动分离效果。在传动链带动下抖动轮转动一周产生3次往复运动，对输送升运上来的三七和土壤混合物施加抖动以破碎土块。

决定抖动轮作业效果的主要因素是转速、振幅和凸轮数。国内三头型抖动轮的振幅一般为 $10 \sim 40 \text{ mm}$ ^[18]，本次抖动轮振幅设计为 20 mm 。三头抖动轮装置，其频率取值范围为 $9 \sim 11 \text{ Hz}$ ^[19]。抖动轮转速为：

$$n = \frac{60f}{Z} \tag{8}$$

式中： n 为抖动轮转速($r \cdot \text{min}^{-1}$)； Z 为抖动轮的头数为3； f 为抖动轮抖动频率，本次设计取 10 Hz 。代入数据计算得 $n = 200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

4 离散元建模与仿真分析

挖掘铲在土壤内所受到的阻力大小与收获机作业速度、挖掘铲入土角和挖掘铲齿数有关。为得到收获机工作时挖掘铲挖掘阻力最小的参数组合，利用EDEM离散元仿真软件建立模拟三七垄的土壤仿真模型，模拟挖掘铲挖掘过程所受到的阻力大小，考虑实际工作情况，使挖掘铲工作深度保持在 150 mm 。以挖掘铲铲数、工作速度和入土角为影响因素，以阻力为试验指标，进行三因素三水平仿真试验分析，得出收获机工时阻力最小的最佳组合参数，便于后期样机的制作。

4.1 土壤颗粒建立

土壤颗粒模型是影响仿真试验结果的关键因素。根据相关研究，结合土壤粒径试验和相关研究，在模型建立过程中，通过前期测得的土壤相关参数测定，选取占比最大的颗粒直径 2.5 mm 为土壤颗粒直径，并按照占比比例确定其颗粒的大小和形状，最终构建具有核状颗粒结构的土壤颗粒模型图8。

4.2 接触参数

EDEM软件仿真离散元参数主要分为材料参数和接触参数两类，材料参数选取材料类型固有的技术参数，土壤密度通过试验测量获得，土壤泊松比、剪切模量、土壤间的恢复系数、静摩擦系数、滚动

摩擦系数通过查阅文献获得^[20]。45 钢材料容重、剪切模量、泊松比,以及 45 钢与土壤的恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数比通过查阅文献^[21]获得(表 2)。

4.3 仿真试验

运用 EDEM 离散元仿真软件模拟林下三七种植垄体要求建立模拟土槽,土槽长宽高为 1 500 mm×800 mm×300 mm。建立颗粒工厂,落料数为 300 kg,每秒落料 100 kg,落料速度为 $-1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,重力加速度为 $-9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,土壤落料时间为 3 s,在土槽内导入用 SoilWorks 建模好的 5 齿、6 齿、7 齿挖掘铲。模拟仿真挖掘铲在挖掘工作过程中所受的阻力大小,在土槽内设置挖掘铲前进速度、入土角以及挖掘铲齿数。设挖掘深度为定值 150 mm,进行离散元仿真,仿真时长 2 s 仿真过程图 9。仿真完成后进行后处理,得到挖掘铲工作过程阻力值。



图 8 土壤颗粒离散元模型

Figure 8 Discrete element model of soil particles

表 2 EDEM 仿真参数

Table 2 Simulation parameter

仿真参数 Simulation parameters	数值 Value
土壤密度 Soil density $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 330
土壤剪切模量 Soil shear modulus /Pa	1.61×10^6
土壤泊松比 Poisson's ratio of soil	0.48
土壤间的恢复系数 Coefficient of recovery between soils	0.73
土壤间的静摩擦系数 Coefficient of static friction between soils	0.98
土壤的滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient of soil	0.16
45 钢密度 Density of 45 steel $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7855
45 钢泊松比 Poisson's ratio of 45 steel	0.31
45 钢剪切模量 Shear modulus 45 steel /Pa	8.27×10^{10}
45 钢与土壤颗粒间静摩擦系数 Coefficient of static friction between 45 steel and soil particles	0.5
45 钢与土壤颗粒间动摩擦系数 Coefficient of dynamic friction between 45 steel and soil particles	0.05
45 钢与土壤颗粒间恢复系数 Coefficient of recovery between 45 steel and soil particles	0.5

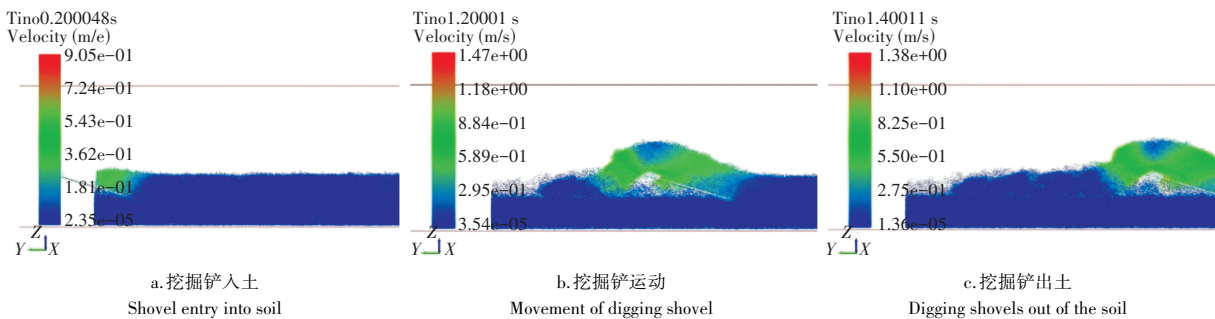


图 9 挖掘铲仿真过程图

Figure 9 Simulation process diagram of digging shovel

4.4 仿真结果分析

挖掘铲在土壤内所受到的阻力大小与收获机作业速度、挖掘铲入土角度和挖掘铲齿数有关^[22],考虑实际工作情况,挖掘铲工作深度保持在 150 mm。以挖掘铲齿数、入土角、作业速度为影响因素,水平为:挖掘铲齿数 5,6,7;入土角 20,25,30°;作业速度 0.6,0.8,1.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,得到各组合参数的阻力大小。运用 Design-expert 分析软件,以机器行驶速度、挖掘铲入土角和挖掘铲齿数为影响因素,挖掘铲在土壤内受到的阻力 F 为试验指标进行三因素三水平旋转正交试验,通过软件后处理,得出挖掘铲受到阻力最小状态下的收获机行驶速度、挖掘铲齿数和挖掘铲入土角最佳组合方式,仿真试验因素如表 3。

以铲齿数 A 、工作速度 B 和入土角 C ,3 个影响因素建立多元回归方程并进行拟合分析,表 4 为回归方程方差分析结果,表 5 为阻力回归方程方差分析。由表 5 可知,阻力 F 的 p 值小于 0.01,表明回归方程极显著, F 的失拟项为 0.463 9,表明回归方程拟合程度高。各个因素在对挖掘阻力影响中,影响程

表3 仿真试验因素及水平

Table 3 Factors and levels of simulation experiments

水平 Level	因素 Considerations		
	A 挖掘铲齿数	B 工作速度/(m·s ⁻¹)	C 入土角/(°)
	Number of teeth of shovel	Working speed	Angle of penetration
1	5	0.6	20
2	6	0.8	25
3	7	1	30

度从大到小为 $C > B > A$, 并且 B 、 C 、 AB 、 A^2 、 B^2 、 C^2 对回归方程影响极显著。

表4 挖掘铲仿真试验方案与结果

Table 4 Digging shovel simulation test plan and results

试验号 Test number	试验因素与指标 Test factors and indicators			
	A 铲齿数	B 工作速度/(m·s ⁻¹)	C 入土角/(°)	F 阻力
	Number of teeth of shovel	Working speed	Angle of penetration	Resistances
1	5	0.6	25	807.9
2	7	0.6	25	788.1
3	5	1.0	25	772.3
4	7	1.0	25	800.8
5	5	0.8	20	785.5
6	7	0.8	20	773.3
7	5	0.8	30	815.1
8	7	0.8	30	823.2
9	6	0.6	20	787.1
10	6	1.0	20	771.5
11	6	0.6	30	816.6
12	6	1.0	30	814.0
13	6	0.8	25	736.3
14	6	0.8	25	739.2
15	6	0.8	25	731.8
16	6	0.8	25	739.3
17	6	0.8	25	735.3

表5 阻力回归方程方差分析

Table 5 Analysis of variance of resistance regression equation

来源 Source	阻力 Resistances			
	平方和 Square sum	均方 Mean square	F	p
模型 Modelling	16 580.5	1 842.28	187.17	<0.000 1
A	2.65	2.65	0.268 7	0.620 2
B	211.15	211.15	21.45	0.002 4
C	2 869.03	2 869.03	291.48	<0.000 1
AB	583.22	583.22	59.25	0.000 1
AC	103.02	103.02	10.47	0.014 3
BC	42.25	42.25	4.29	0.077 0
A ²	3 525.2	3525.2	358.15	<0.000 1
B ²	3 060.39	3 060.39	310.92	<0.000 1
C ²	4 855.92	4 855.92	493.34	<0.000 1
残差 Residual	68.9	9.84		
失拟项 Lack of fit	30.27	10.09	1.04	0.463 9
纯误差 Pure error	302.00	73.00		
总和 Total	2.053×10 ⁵			

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

Note: $p < 0.01$ (highly significant, ***); $0.01 \leq p < 0.05$ (significant, **).

将仿真得到的每组数据填写进 Design-expert 分析软件相应表格中生成交互响应曲面如图 10。由图 10 可知,当工作速度一定时,阻力 F 随铲齿数的增大先减小后增大,当铲齿数与工作速度不变时,挖掘铲受到的阻力随着入土角度的增加先减小后增大,入土角越小,土壤在铲面上运动距离增长,增大机器行驶阻力;入土角过大时,铲面面积增大,土壤通过挖掘铲阻力时阻力增大。由表 4 可知,收获机工作过程所受最小阻力 731.8 N,得到挖掘铲最优工作参数组合为 $A_2B_2C_2$,即挖掘铲齿数 6,收获机工作速度 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,挖掘铲入土角度 25° 。

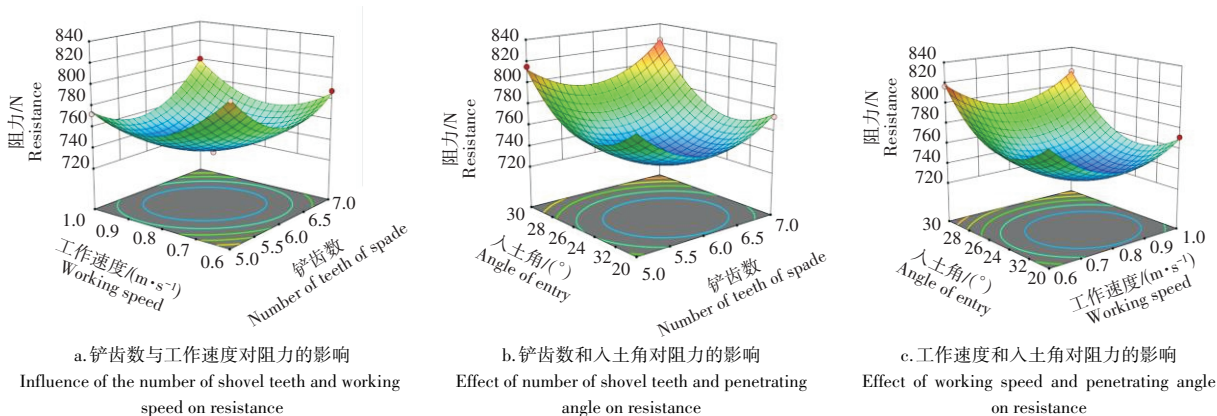


图 10 交互因素对阻力的影响

Figure 10 The influence of interaction of factors on resistance

5 样机试制与模拟试验

5.1 样机试制

通过前期关键部件设计计算与挖掘铲最优参数组合分析求解后,得到收获机最优工作参数。对收获机样机关键部件进行加工装配,得到样机实物如图 11。



图 11 样机实物装配图

Figure 11 Prototype assembly diagram



图 12 田间试验

Figure 12 Simulated field test

5.2 样机试验

样机改造花费时间较长,错过了林下三七收获季节,无法到林下三七实地进行收获试验。为了进一步验证样机作业性能,采用 $A_2B_2C_2$ 组合,即机器前进速度 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、入土角 25° 、挖掘铲齿数 6、升运筛线速度 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、抖动轮转速 $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 进行田间试验验证(图 12)。试验地垄高 300 mm,垄宽 1 200 mm。样机机械化收获三七,试验 3 次,每次 50 株,统计三七块根的损失率、损伤率和收获机的生产率。

由表 6 可知,收获机样机田间试验效果良好,3 次试验结果损失率 11.33%,伤根率 6.67%,去土效果良好。收获机挖掘铲破土效果较好相较于第一次下地试验所存在的问题均得到解决,样机生产率

表 6 收获试验结果

Table 6 Harvesting test results

项目 Item	次数 Number of times			平均值 Average value
	1	2	3	
损失率 Loss rate/%	12	8	14	11.33
伤根率 Root injury rate/%	6	10	4	6.67
生产率 Productivity/($\text{hm}^2\cdot\text{h}^{-1}$)	0.150	0.153	0.145	0.149

约为 $0.149 \text{ hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$,机械收获的最大优势就是工作效率大于人工收获,人工收获成本高劳动强度大。利用机械化收获可以促进林下三七种植产业的标准化、规模化,同时能节省人力物力。试验表明改进的林下三七收获机样机工作行走稳定性较好作业流畅,挖掘铲破土效果和输送分离装置输送分离效果也较好。样机以仿真优化的组合参数进行作业阻力较小,理论分析与田间试验验证符合。

5 讨论与结论

为有效解决林下三七收获机械化,提升林下三七收获的机械化水平,促进林下三七产业化进程。本研究基于对国内外块根块茎机械化收获技术研究及相关林下三七种植农艺调研基础,研制出林下三七收获机样机。本研究确定了收获林下三七的合理采收工艺路线;对收获过程中可能出现的各种问题进行了研究,同时借助计算机软件进行林下三七收获机关键部件分析,通过理论图解、离散元仿真、有限元分析与林下三七基地试验相结合的方法,依据林下三七种植的基本特性,对林下三七收获机关键部件进行合理的设计与加工。结合林下三七种植农艺要求,针对市面上缺乏林下三七收获机械导致林下三七收获作业人工劳动强,设计了一种小型手扶式林下三七收获机。

利用EDEM离散元仿真软件建立模拟三七垄的土壤仿真模型,模拟挖掘铲挖掘过程所受到的阻力大小,考虑实际工作情况,使挖掘铲工作深度保持在150 mm。以挖掘铲铲数、工作速度和入土角为影响因素,以阻力为试验指标,进行三因素三水平仿真试验分析,得出挖掘铲最优组合参数:挖掘铲铲齿数6,工作速度 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,入土角度 25° 。完成林下三七收获机样机试制和样机试验,3次试验结果为损伤率6.67%,损失率11.33%,去土效果良好。试验结果表明,林下三七收获机样机工作行走稳定性较好,作业流畅,挖掘铲破土效果和输送分离装置输送分离效果也较好,收获作业性能和挖掘铲破土性能较好,伤根率和损失率较低,生产率 $0.149 \text{ hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$,收获机正常作业效率下与人工相比具有更高的收获效率,节省更多成本,林下三七收获机达到了初步的设计要求。

参考文献:

- [1] 卢汝梅,黄志其,李兵,等.三七化学成分[J].中国实验方剂学杂志,2016,22(7):62-64.
- [2] 袁刚,杨永发,杨朝明,等.遥控自走式三七收获机设计与试验[J].农机化研究,2019,41(2):123-127.
- [3] 崔振猛,张兆国,王法安,等.4SD-1700型悬挂式三七收获机设计与试验[J].农机化研究,2019,41(2):134-139.
- [4] 陈林,祁玉卓,高波,等.振动式根茎类中药材收获机挖掘装置设计[J].农机化研究,2024,46(4):120-127.
- [5] 魏宏安,王蒂,连文香,等.4UFD-1400型马铃薯联合收获机的研制[J].农业工程学报,2013,29(1):11-17.
- [6] 金鑫,杜新武,王世光,等.胡萝卜收获机根茎分离装置设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(3):82-89.
- [7] 王申莹,胡志超,彭宝良,等.基于ADAMS的甜菜收获机自动对行探测机构仿真[J].农业机械学报,2013,44(12):62-67.
- [8] 尚书旗,李国莹,杨然兵,等.4HQL-2型全喂入花生联合收获机的研制[J].农业工程学报,2009,25(6):125-130.
- [9] 宋江,邱胜蓝,王新忠,4B-1200型平贝母药材收获机的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(8):34-41.
- [10] 郑德聪,赵美香,陈恭良,等.4SB-800型半夏收获机的设计[J].农业工程学报,2007,23(10):141-144.
- [11] 杜宗霖,张兆国,刘伟健,等.工厂化种植三七收获机模态与疲劳寿命分析[J].农机化研究,2020,42(2):32-35,145.
- [12] 吕金庆,孙贺,兑瀚,等.粘重土壤下马铃薯挖掘机分离输送装置改进设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(11):146-155.
- [13] 张丹,张兆国,曹永辉,等.三七收获机组合式挖掘铲设计与试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2018,39(1):38-44.
- [14] 张兆国,王法安,张永成,等.自走式三七收获机设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(增刊1):234-240.
- [15] 田亮,曹成茂,张远,等.联合式前胡收获机设计与试验[J].安徽农业大学学报,2022,49(5):815-822.
- [16] 陆建,缪明,缪小兵,等.白萝卜收获机挖掘铲研究与试验[J].中国农机化学报,2016,37(10):57-60.
- [17] 杜岳峰.丘陵山地自走式玉米收获机设计方法与试验研究[D].北京:中国农业大学,2014.
- [18] 杨世成,安宏宇.马铃薯收获机设计试验研究[J].农机化研究,2007,29(11):161-163.
- [19] 李涛,周进,徐文艺,等.4UGS2型双行甘薯收获机的研制[J].农业工程学报,2018,34(11):26-33.
- [20] 李博,陈军,黄玉祥.机械与土壤相互作用的离散元仿真研究进展[J].农机化研究,2015,37(1):217-222.
- [21] 王宪良,胡红,王庆杰,等.基于离散元的土壤模型参数标定方法[J].农业机械学报,2017,48(12):78-85.
- [22] 张远.前胡联合收获机的设计与试验[D].合肥:安徽农业大学,2022.

[责任编辑 亓国]