

振动分离式根茎类中药材 收获机设计与试验

张学剑¹, 戴飞¹, 史瑞杰¹, 赵武云¹, 马海军², 赵新平²

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃洮河拖拉机制造有限公司, 甘肃定西 730500)

摘要:根茎类中药材收获机使用固定式挖掘铲收获时挖掘阻力大、挖掘深度不足、碎土能力差、功率损耗严重, 针对上述问题设计一种振动挖掘分离根茎类中药材收获机。该机采用偏心轮构成的振动挖掘装置、一级药土分离装置、振动式二级药土分离装置等结构, 实现根茎类药材的挖掘、分离、输送。对关键部件进行设计分析与仿真, 并进行了田间试验。仿真试验表明: 挖掘铲入土性能好, 挖掘时对根茎挖掘的最大位移量为 165 mm; 输送分离装置能彻底分离根茎和土壤。田间试验表明: 该收获机挖净率为 95.14%, 伤损率为 1.24%, 挖掘深度均值为 400 mm, 不低于设计的最小值。作业期间整机运行平稳, 作业指标符合根茎类中药材收获标准, 满足根茎类中药材机械化收获要求, 可以作为振动分离式根茎类中药材收获机使用。

关键词:根茎类中药材; 挖掘装置; 偏心传动; 振动分离; 收获机; EDEM-Recur Dyn

中图分类号:S225.7⁺9 **文献标志码:**A

Design and experiment of vibrating separating rhizome harvesting machine for Chinese medicinal materials

ZHANG Xuejian¹, DAI Fei¹, SHI Ruijie¹, ZHAO Wuyun¹, MA Haijun², ZHAO Xinping²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Tao River Tractor Manufacturing Co., Ltd., Dingxi, Gansu 730500, China)

Abstract: To solve the problems such as high digging resistance, insufficient digging depth, poor soil crushing ability and serious power loss, a vibratory digging and separating harvester for root and stem Chinese medicinal materials was designed. This new designed machine adopted vibration excavation device composed of eccentric wheel, primary medicine soil separation device, secondary medicine soil separation device and other structures to realize the excavation, separation and transportation of root and stem medicinal materials. The key components were redesigned, analyzed and simulated, and field tests were carried out. The simulation test showed that the digging shovel had good performance in soil, and the maximum displacement of digging and throwing on the roots was 165 mm. The conveying separation device was able to achieve a thorough separation between the roots and soil. The field test results showed that the net rate of the harvester was 95.14%, the damage rate was 1.24%, and the average digging depth was 400 mm, which was higher than the design minimum value. During the operation period, the whole machine ran smoothly, the operation index met the harvest standards of rhizome Chinese medicinal materials, met the requirements of mechanized harvesting of rhizome Chinese medicinal materials, which could be used as a vibrating separated rhizome Chinese medicinal material harvesting machine.

Keywords: rhizome Chinese herbal medicine; digging device; eccentric drive; vibration separation; harvester; EDEM-Recur Dyn

收稿日期:2023-10-24

修回日期:2023-12-22

基金项目:甘肃省技术创新引导计划科技专员专项项目(22CX8GA052);甘肃农业大学伏羲青年英才培养计划项目(Gaufx-03Y01)

作者简介:张学剑(1999-),男,甘肃临夏人,硕士研究生,研究方向为旱区膜土-机器-作物互作系统机理研究。E-mail: 2280765938@qq.com

通信作者:戴飞(1987-),男,甘肃兰州人,教授,主要从事旱区膜土-机器-作物互作系统机理研究。E-mail: daifei@gsau.edu.cn

我国是中药材种植面积最大和利用中药材资源最多的国家之一。据国家中药材产业技术体系统计,2020年全国中药材种植总面积约为 5.9×10^6 hm^2 ,甘肃省的种植面积超过 3.0×10^5 hm^2 ,其中根茎类中药材种植面积超过 1.0×10^5 hm^2 ^[1-2]。随着中药材种植面积的不断扩大,中药材收获机也在快速发展。挖掘是中药材收获过程中最重要的工序之一,而挖掘装置是药材收获机最重要的部件之一,其工作性能对收获机的工作性能起着至关重要的作用^[3]。但目前中药材的主要收获方式仍是以人工挖掘为主,而对于根茎类药材,人工作业难以在不影响药材品质的基础上将其完整挖出,这严重影响到药材整体的产量和品质,以及农民的经济收益^[4]。

现有的根茎类中药材挖掘机普遍是以薯类挖掘机为原型的改款,作业深度难以满足根茎类药材的挖掘要求,挖掘阻力较大,导致拖拉机功耗过高^[5-6]。近年来国内大量学者对挖掘铲研究设计,王亨泰等^[7]根据蜈蚣前足爪趾的结构设计了仿生挖掘铲,其在铲面末端高度100~160 mm的范围内,仿生铲所受阻力均小于平面铲;张兆国等^[8]根据野猪头的结构设计了三七仿生挖掘铲,并进行对比试验,其平均挖掘阻力比平面挖掘铲减小387.26 N,减阻率为24.29%。陈林等^[9]采用曲柄摇杆机构研究设计了振动挖掘装置,铲尖振幅为10.4 mm,其挖掘铲减阻效果明显。许渊等^[10]根据平行四杆机构研究设计了振动挖掘装置,试验时能有效减小挖掘阻

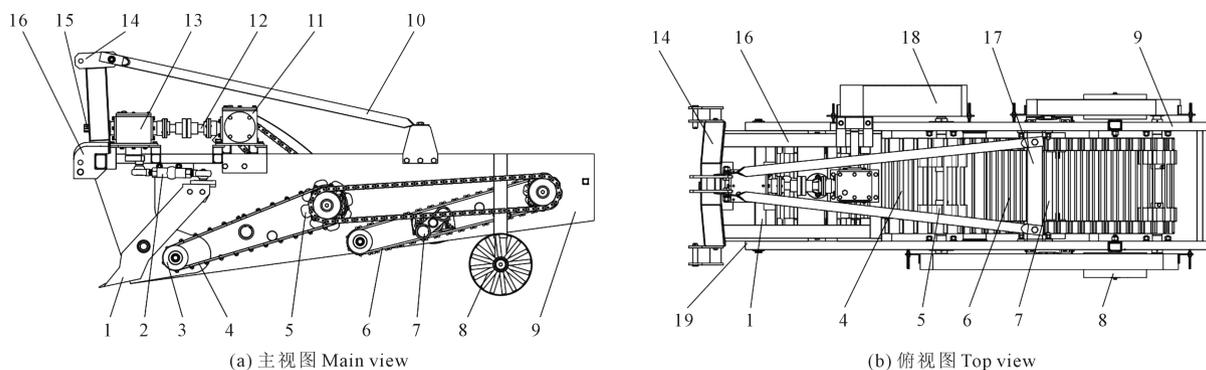
力,具有良好的碎土分离效果。然而仿生挖掘铲在工作时易折断,平行四杆机构占用空间大,增加整机的重量,功率消耗大等问题仍然突出。本研究利用偏心轮和球铰推杆机构设计了振动挖掘装置,整体结构紧凑,占用空间小,可调节入土角度,其入土、碎土和挖掘能力优于普通挖掘铲,结构性能优于平行四杆机构振动挖掘铲。

针对根茎类中药材收获过程中,机械化效率低,收获时挖掘深度不够,挖净率低、挖掘阻力大、拖拉机动力不足等现状,同时结合黄芪、党参等长根茎类中药材生长深度深和种植农艺模式等特点,设计一种振动分离式根茎类中药材收获机,可进行深度振动挖掘,一次性完成根茎类中药材的挖掘、输送、分离、铺放等工作,并对该机作业性能进行了田间试验验证。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

振动分离式根茎类中药材收获机针对根茎类药材种植环境复杂、根茎生长深度深、挖掘阻力大、拖拉机输出动力不够等问题而设计,整机的结构体型不宜过大,能在有限的动力条件下完成根茎类中药材的挖掘、输送、分离、铺放等工作。该机采用悬挂式牵引方式,由拖拉机提供动力,其挖掘铲上下往复振动并向前运动的方式进行中药材的挖掘工作。整机结构示意图见图1。



1.挖掘铲组件;2.偏心传动组件;3.分离装置从动轮;4.一级药土分离装置;5.梅花轮;6.振动式二级药土分离装置;7.振动装置;
8.行走装置;9.左侧壁板;10.悬挂拉杆;11.输送装置变速箱;12.变速箱连接轴;13.挖掘装置变速箱;14.悬挂架;15.动力输入轴;
16.机架;17.横向拉杆;18.链防护罩;19.右侧壁板

1. Excavation shovel component; 2. Eccentric transmission component; 3. Separation device driven wheel; 4. Primary drug soil separation device;
5. Plum blossom wheel; 6. Vibration type secondary drug soil separation device; 7. Vibration device; 8. Mobile device; 9. Left side panel;
10. Suspension rod; 11. Conveyor gearbox; 12. Gearbox connecting shaft; 13. Excavator gearbox; 14. Suspension bracket;
15. Power input shaft; 16. Frame; 17. Horizontal tie rod; 18. Chain guard; 19. Right side panel

图1 振动分离式根茎类中药材收获机结构示意图

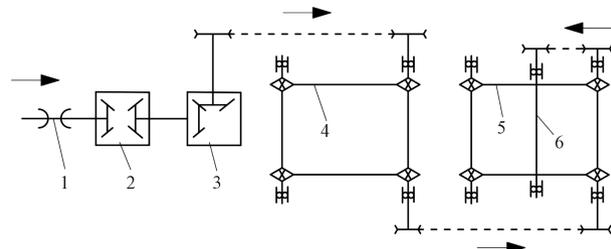
Fig.1 Schematic diagram of the structure of a vibration separated rhizome type traditional Chinese medicine harvester

整机主要部件包括振动挖掘装置、一级药土分离装置、振动式二级药土分离装置、振动装置、地轮行走装置。挖掘铲采用振动式平面单铲,由偏心机构带动做周期性往复旋转运动;一级输送链由刚性链条、柔性橡胶链托、梅花轮、从动轮组成,支撑轮张紧输送链;振动式二级输送链中间设计振动装置,振动装置有两个抖动轮;地轮行走机构采用从动行走,限制挖掘深度和支撑整机。

1.2 工作原理

振动分离式根茎类中药材收获机由拖拉机提供动力牵引前行,传动系统如图 2 所示,箭头指示方向为动力传递方向,机组工作时由拖拉机提供动力,经万向传动轴传递到变速箱,经变速箱变速换向后,通过偏心轮、链传动等将动力传递至振动挖掘装置、一级药土分离装置,并随后进一步传输动力至振动式二级药土分离装置和振动装置。拖拉机的输出转速有 $720 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $540 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 两种,选择 $540 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 作为拖拉机的工作转速。振动挖掘铲的周期性振动频率为 5.4 Hz ,一级药土分离装置传动轴的转速为 $174 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,振动式二级药土分离装置传动轴的转速为 $174 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,振动装置的转速为 $198 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

工作时,挖掘铲挖掘深度为 $200 \sim 500 \text{ mm}$,随着收获机的前进,振动挖掘铲振动入土,将中药材和土壤铲起,并向后移动到一级药土分离装置。输送装置变速箱的左端输出轴将动力传递给一级药土分离装置,药材和土壤在一级药土分离装置的输送下向后运动,同时进行药材和土壤的一级分离。药材和土壤经一级药土分离装置输送分离,到达振动式二级药土分离装置,在振动装置的作用下,大块土壤被破碎,通过输送链的空隙掉落到地面,分离



1. 传动轴; 2. 挖掘装置变速箱; 3. 输送装置变速箱;
4. 一级药土分离装置; 5. 振动式二级药土分离装置; 6. 振动装置
1. Transmission shaft; 2. Excavator gearbox; 3. Conveyor gearbox;
4. Primary drug soil separation device; 5. Vibration type secondary drug soil separation device; 6. Vibration device

图 2 振动分离式根茎类中药材收获机传动示意图

Fig.2 Schematic diagram of the transmission of a vibration separated rhizome type traditional Chinese medicine harvester

出来的药材经输送链的输送,向后运动掉落铺放到地表上。

1.3 主要技术参数

振动分离式根茎类中药材收获机主要适用于西北旱区根茎类药材挖掘作业,该机主要技术参数如表 1 所示。

2 关键装置设计

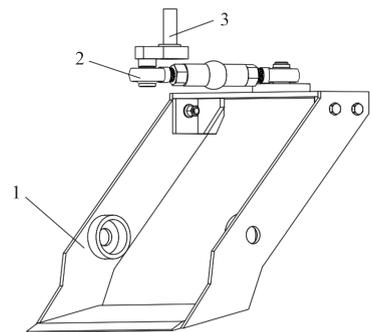
2.1 振动挖掘装置

振动挖掘装置是中药材收获机的核心装置,机组收获工作时,挖掘铲首先入土挖掘,挖掘铲的入土碎土能力直接影响随后的药土分离效果,进而影响整个机组的收获效果^[11-12]。所以本研究在设计振动分离式中药材收获机时,重点设计振动挖掘装置,样机能够达到根茎类中药材的收获要求,具有良好的收获效果。振动挖掘装置由挖掘铲组件和偏心传动组件构成,采用偏心传动和球铰推杆传动方式,如图 3 所示。

表 1 振动分离式根茎类中药材收获机技术参数

Table 1 Technical parameters of vibration separated rhizome type traditional Chinese medicine harvester

参数 Parameter	数值 Value
规格型号 Specification and model	4Y-500
结构形式 Structural style	悬挂式 Suspension type
整机尺寸(长×宽×高) Machine size(length×width×height)/(mm×mm×mm)	2810×880×1220
工作幅宽 Working width/mm	500
挖掘深度 Excavation depth/mm	200~500
结构质量 structural quality/kg	570
配套动力 Supporting power/kW	51.5~58.8
挖掘铲形式 Excavation shovel form	振动式平面单铲 Vibrating flat single shovel
振动形式 Vibration form	偏心推杆式 Eccentric push rod type
工作效率 Productivity/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.14~0.25



1. 挖掘铲组件; 2. 偏心传动组件; 3. 挖掘装置输入轴
1. Excavation shovel component; 2. Eccentric transmission component;
3. Excavation device input shaft

图 3 振动挖掘铲装置结构简图

Fig.3 Vibration digging shovel structure schematic

2.1.1 挖掘铲的设计 挖掘铲根据运动形式可分为振动式挖掘铲和固定式挖掘铲^[13-14]。本研究根据根茎类中药材的生长状况和收获要求,参考现有栅条形挖掘铲和平面三角形挖掘铲的特点^[15],结合中药材机械收获时挖掘铲受力大易折断的问题,设计一种平面单铲形振动挖掘铲,如图 4 所示。平面单铲形振动挖掘铲强度高、入土能力好,挖掘深度能达到药材根茎的最大长度,碎土分离效果好,能有效防止土壤和药材根茎的拥堵。

平面单铲形挖掘铲由铲刃和挖掘铲侧板等零件组成,其铲刃固定在挖掘铲侧板上,铲刃前端厚度较小,便于入土。挖掘铲侧板连接机架,挖掘铲上梁连接球铰推杆,工作时挖掘铲上下振动前进,利用铲刃的运动将土壤中的药材根茎挖掘出来,减少挖掘阻力,更深入地切入土壤,完成挖掘和初次分离。

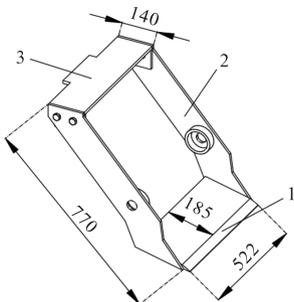
(1)入土角。挖掘铲入土角的大小决定入土性能和挖掘深度。为了减少对药材的损伤,达到更好的挖掘效果,挖掘铲在工作时入土角度应保证能将药材根茎完整掘出,使掘出物在铲面上匀速运动,并能顺利输送到挖掘铲后端^[16-17]。现对药土混合物进行受力分析,如图 5 所示。其中, V_m 为收获机前进的速度、 F 为掘起药土混合物所需要的力、 F_f 为挖掘铲对药土混合物的摩擦力、 F_N 为挖掘铲对药土混合物的作用力、 G 为药土混合物的重力、 L 为挖掘铲铲刃及铲体长度、 α 为挖掘铲入土角度、 μ 为土壤对钢的摩擦系数。

入土角 α 的理论值,可由沿挖掘铲运动的掘起物作用力的平衡方程确定。

$$\begin{cases} F \cos \alpha - F_f - G \sin \alpha = 0 \\ F_N - G \cos \alpha - F \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (1)$$

化简方程后得

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{F - \mu G}{\mu F - G} \\ \alpha = \arctan \frac{F - \mu G}{\mu F - G} \end{cases} \quad (2)$$



1. Edge of shovel; 2. Dig shovel side plate; 3. Shovel up the beam
图 4 平面单铲形挖掘铲结构简图/mm

Fig.4 Schematic diagram of flat single shovel structure

试验表明:入土角 α 越小,挖掘深度减小,挖掘阻力减小,入土性能增强,但碎土性能差,容易出现壅土现象;入土角 α 越大,挖掘深度增大,挖掘阻力增大,入土性能降低,但碎土性能较强。通常 α 取 25° ^[18-20]。

(2)工作深度。根茎类中药材的根茎深埋地下,且有相互交叉连接缠绕的现象,生长的深度范围在 200~500 mm 之间^[21],收获中避免挖断根茎主根,挖掘铲的最大挖掘深度应大于 500 mm。

2.1.2 偏心传动机构设计 挖掘装置使用平行四杆机构传输动力,机构结构较大,在整个机组上占用空间较多^[22-23]。本研究设计偏心轮和球铰推杆传递动力,减小机组的结构,如图 6 所示。偏心轮的动力来自挖掘装置变速箱下端的传动轴,偏心轮的一端连接球铰推杆将动力传输给球铰推杆,再通过球铰推杆把动力传输到挖掘铲组件上。

偏心传动机构由偏心轮、球铰推杆和动力输入轴组成,动力输入轴连接挖掘装置变速箱和偏心轮,球铰推杆连接偏心轮和挖掘铲组件。根据振动挖掘铲的运动频率和幅度,设计偏心轮的偏心距为 50 mm;球铰推杆由两个传动球铰和中间连杆组成,用螺母锁紧,其长度可调节,中间连杆长度为 150 mm,传动球铰球轴直径为 80 mm,螺纹长度为 100 mm,球铰推杆的长度调节范围为 320~420 mm。工

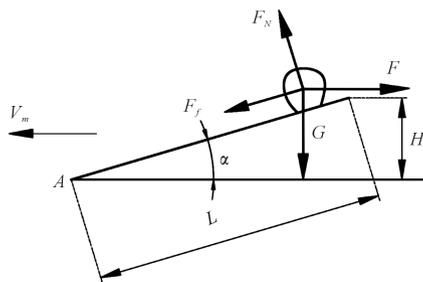
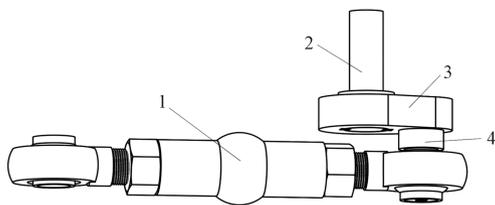


图 5 药土混合物受力分析图

Fig.5 Force analysis diagram of medicine-soil mixture



1. 球铰推杆; 2. 动力输入轴; 3. 偏心轮; 4. 偏心连接轴
1. Ball hinge push rod; 2. Power input shaft; 3. Eccentric; 4. Eccentric coupling shaft

图 6 偏心传动机构简图

Fig.6 Eccentric transmission mechanism schematic

作时,通过中间连杆调节其长度,达到不同的挖掘深度和入土角,以适应不同土壤环境和药材种类,完成根茎类中药材的挖掘收获。球铰推杆结构如图 7 所示。

2.1.3 振动挖掘装置的运动分析 振动挖掘装置的运动由偏心轮的转动和挖掘铲的振动组成,偏心轮机构将主轴的旋转运动转化为垂直方向的振动,即垂直于挖掘机前进方向的振动。根据拖拉机输出转速和挖掘装置变速箱的传动比(传动比为 1.67),计算得出偏心轮的转速为 $324 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,角速度为 $5.4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。偏心轮盘中心为 O 点,拖拉机前进方向为水平向右,设在机组的俯视面上,拖拉机前进方向为 X 轴,垂直于拖拉机前进方向为 Y 轴,从 X 轴正向开始旋转,则偏心轮的中心 $O(X, Y)$,经过时间 t 以后的轨迹方程^[24]为:

$$\begin{cases} X = r\cos\omega t + V_m t \\ Y = r\sin\omega t \end{cases} \quad (3)$$

式中, r 为偏心盘半径; ω 为偏心盘角速度; V_m 为拖拉机前进速度; t 为时间。

对时间 t 进行求导,得到偏心轮中心 $O(X, Y)$ 的速度方程为:

$$\begin{cases} V_x = V_m - r\omega\sin\omega t \\ V_y = r\omega\cos\omega t \end{cases} \quad (4)$$

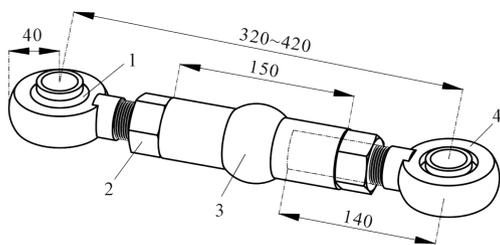
当偏心轮刚开始转动时,前进方向的分速度应为零。则

$$V_x = V_m - r\omega\sin\omega t = 0$$

拖拉机前进速度 $V_m = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,偏心轮角速度为 $\omega = 5.4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,从而确定偏心轮的半径 $r = 50 \text{ mm}$,保证振动挖掘机构能够有一定振幅,同时整机的晃动程度较小,确保整机的稳定性。

2.2 药土分离装置

该装置动力经传动装置的传动链传递到主动轮轴,从而带动整个分离输送装置转动。如图 8 所示,



1. 传动球轴; 2. 锁紧螺母; 3. 中间连杆; 4. 传动球铰

1. Driving ball shaft; 2. Lock nut; 3. Intermediate connecting rod; 4. Driving ball hinge

图 7 球铰推杆结构简图/mm

Fig.7 Structure diagram of ball hinge push rod

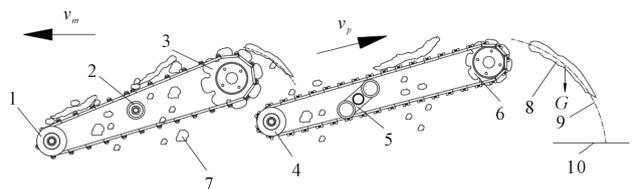
两级药土分离输送装置由一级药土分离装置和振动式二级药土分离装置组成,分离输送链为皮带栅杆式。其中,一级药土分离装置将药土混合物进行一级分离,同时向后输送;振动式二级分离装置将土壤破碎和抖落,并将药材根茎输送,铺放到地表。

$$\lambda = \frac{v_p}{v_m} \quad (5)$$

式中, v_p 为药土分离输送带线速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v_m 为样机前进速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); λ 取值一般是 0.8~2.5,为避免药土混合物在输送链上堆积,线速度应该略大于机组行驶速度,但防止药材根茎损伤,输送链线速度不能过高。根据相关研究, v_p 为 $1.15 \sim 1.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时药土分离效果较好^[26]。因此,为保证较高的中药材根茎收获质量和生产率,根茎类中药材收获机作业速度应控制在 $0.8 \sim 1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2.2 二级振动式药土分离装置 为保证药土混合物更好的分离和完成输送铺放工作,设计了振动式二级药土分离装置,主要由分离输送带、主动梅花轮、从动轮、摆臂式振动装置等部件构成。结构如图 9(见 270 页)所示。

振动式二级药土分离装置主要是以中药材根茎的输送和土块的破碎为主,线速度设计和一级分离装置一致,设计输送链栅杆的直径为 8 mm ,间距为 65 mm 。摆臂式振动装置为主动式,实现输送链栅杆的抖动和土块的碰撞,完成药土混合物的进一



1. 一级从动轮; 2. 支撑轮; 3. 一级主动轮; 4. 二级从动轮; 5. 振动装置; 6. 二级主动轮; 7. 土块; 8. 药材根茎; 9. 根茎运动轨迹; 10. 地面

1. One stage driven wheel; 2. Back-up wheel; 3. First stage driving wheel; 4. Secondary driven wheel; 5. Vibration device; 6. Two-stage driving wheel; 7. Clod; 8. Medicinal rhizome; 9. Root Movement Trajectory; 10. Ground

图 8 两级药土分离输送装置结构简图

Fig.8 Structure diagram of two-stage medicated soil separation and conveying device

步筛分,达到中药材根茎和土块更好的分离效果。振动装置结构如图10所示。

输送带的抖动频率和振幅直接影响药土分离的效果和根茎的伤损率,其应保持在一定的范围内^[27]。振动装置设计有两个抖动轮,转速为 $198 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,故输送带的抖动频率为 6.6 Hz ,转动时抖动轮基圆半径为 75 mm ,振幅设计为 15 mm 。

3 仿真试验

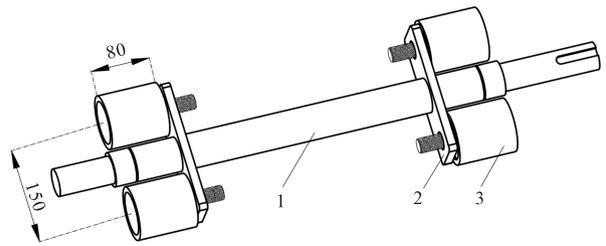
3.1 基于DEM-Recur Dyn的挖掘装置仿真分析

3.1.1 模型与参数的建立 在离散元软件EDEM中,建立黄芪离散元模型和土壤颗粒模型如图11。根据黄芪尺寸特征和生长特性^[28],黄芪离散元模型使用75个颗粒建立,颗粒的最大半径为 8.6 mm ,最小半径为 2.4 mm ,黄芪的长度为 300 mm 。根据文献^[29]建立土壤颗粒模型,考虑实际土壤的情况与软件仿真时的计算量,建立土壤模型为单球颗粒,土壤半径为 5 mm 。

在EDEM软件中生成土壤和黄芪的田间生长特性模型,根据收获机的前进速度与仿真计算量,建立土槽大小为 $1\ 000 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 。据黄芪行距 204 mm 、株距 162 mm 的种植农艺模式,建立土壤和黄芪颗粒工厂,参数设置完成后开始生成土壤和黄芪的生长模型,生成土壤颗粒为 $240\ 000$ 个,黄芪为 18 根,黄芪最大深度为 310 mm 。黄芪—土壤的生成过程,如图12所示,土壤和黄芪模型在 3.2 s 完全生成,黄芪竖立且完全埋于土壤中,最大深度为 310 mm ,与黄芪实际生长情况一致,可用于挖掘装置的仿真试验。

在三维制图软件SolidWorks中建立挖掘装置三维模型,另存为.x_t格式后导入Recur Dyn,同时为挖掘装置设置运动和接触,偏心轮的角速度为 $34 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,挖掘装置前进的速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,如图13所示。EDEM软件中颗粒与颗粒、颗粒与几何体间的接触参数按照文献^[29-30]设置,未知参数按照文献^[31-33]试验方法所得,土壤颗粒、模型和作物的属性及相关参数^[29-30]如表2所示。

完成挖掘铲运动设置和土壤—黄芪模型建立,进行EDEM-Recur Dyn联合仿真。在Recur Dyn软件中调节好挖掘装置位置,然后导入到EDEM软件中进行仿真设置。仿真时间 1.5 s ,时间步长 $1.2 \times 10^{-5} \text{ s}$,数据保存间隔 0.01 s ,设置完成后开始仿真计算。



1. 转动主轴;2. 振动摆臂;3. 抖动轮

1. Rotating spindle; 2. Vibrating pendulum arm; 3. Vibrating wheel

图10 振动装置结构简图

Fig.10 Structure diagram of vibration device

表2 离散元仿真参数

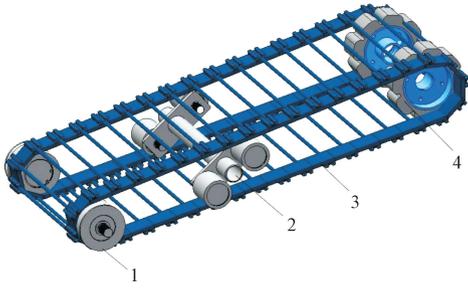
Table 2 Discrete element simulation parameters

材料 Materials	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量 Shear modulus/Pa	密度 Density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
土壤 Soil	0.300	5×10^7	2600
黄芪 Astragalus	0.416	1.568×10^7	840
钢 Steel	0.300	7.9×10^{10}	7865
接触类型 Contact type	静摩擦因数 Static friction factor	动摩擦因数 Dynamic friction factor	恢复系数 Recovery coefficient
土壤-土壤 Soil-soil	0.680	0.270	0.210
土壤-黄芪 Soil-astragalus	0.453	0.170	0.587
土壤-钢 Soil-steel	0.310	0.130	0.540
黄芪-黄芪 Astragalus-astragalus	0.453	0.086	0.587
黄芪-钢 Astragalus-steel	0.349	0.074	0.509

3.1.2 仿真结果分析 完成挖掘装置EDEM-Recur Dyn联合仿真,在EDEM软件后处理界面中分析挖掘装置的仿真过程。

如图14所示为土壤扰动情况。在 0.09 s 时挖掘铲开始与土壤接触,此时的挖掘铲铲刃处于最高点,随后挖掘铲在竖直方向上振动入土;在 0.29 s 时挖掘铲完成第一次上下往复运动,此时铲刃上方的土壤受到向上和向前的作用力,产生一定的速度且有向上的趋势;在 0.74 s 时挖掘装置运动到土壤模型中部,此时挖掘铲挖过的土壤被铲刃抬升已变得疏松,且土壤在挖掘铲前方有堆积现象;在 1.5 s 时挖掘装置完成挖掘作业,土壤已完全疏松,部分黄芪作物露出土壤表面且没有壅土现象。

提取土壤运动速度随时间变化曲线,如图15所示。随着挖掘铲的振动挖掘作业,土壤平均速度根据振动频率有明显变化,其最大平均速度为 $0.48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在挖掘铲平稳作业过程中,土壤速度在 $0.12 \sim 0.42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间规律变化,说明振动挖掘铲对土壤的扰动能力强,挖掘效果好。



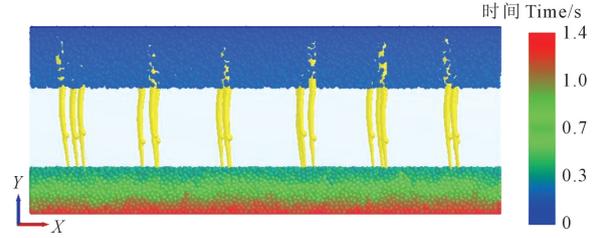
1.二级从动轮;2.振动装置;3.输送链;4.主动梅花轮

1. Secondary driven wheel; 2. Vibration device; 3. Conveyor chain;

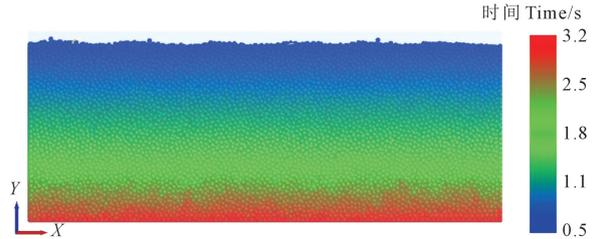
4. Driving torx wheel

图 9 振动式二级药土分离装置结构简图

Fig.9 Structure diagram of vibrating type secondary medicine and soil separation device



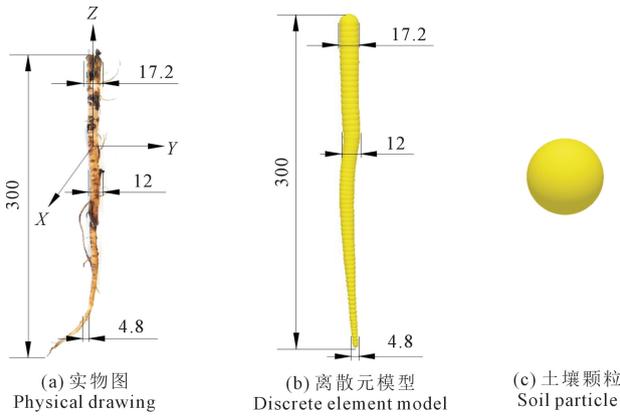
(a) 1.4 s



(b) 3.2 s

图 12 不同时刻土壤—黄芪模型生成情况

Fig.12 Generation of soil-astragalus model at different time



(a) 实物图

Physical drawing

(b) 离散元模型

Discrete element model

(c) 土壤颗粒

Soil particle

图 11 黄芪和土壤模型

Fig.11 Astragalus root and soil models

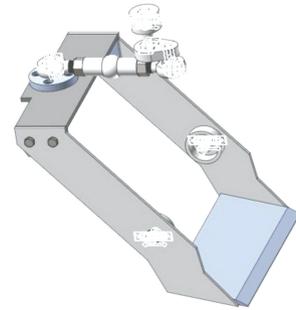
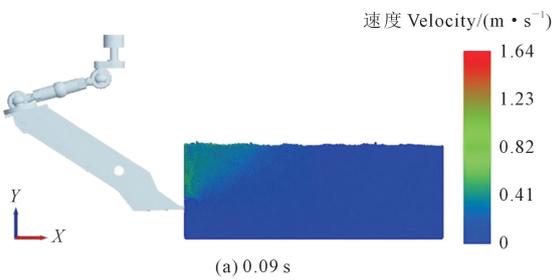
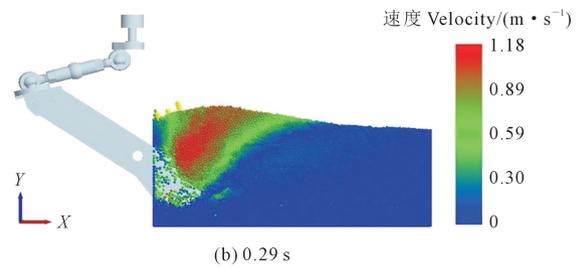


图 13 Recur Dyn 中挖掘装置模型

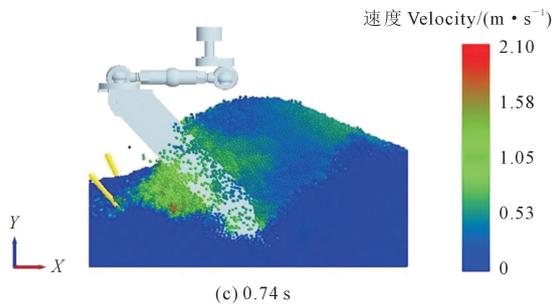
Fig.13 Mining device model in Recur Dyn



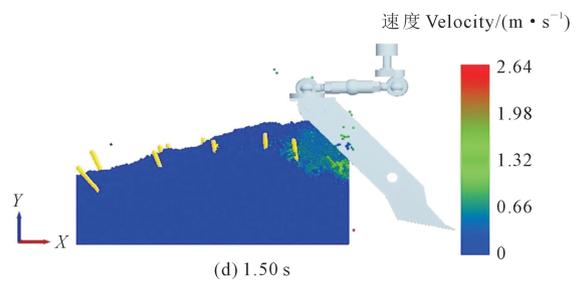
(a) 0.09 s



(b) 0.29 s



(c) 0.74 s



(d) 1.50 s

图 14 土壤扰动速度云图

Fig.14 Cloud map of soil disturbance velocity

图 16(见 272 页)所示为黄芪位移云图。在振动挖掘过程中,黄芪随着土壤向上运动,并且黄芪与土壤产生分离效果,挖掘铲没有接触和损伤黄芪。

提取不同时刻黄芪的 Z 轴平均坐标值,做出随时间变化的图线,如图 17 所示。经过振动挖掘铲作业,黄芪在 Z 轴平均坐标值从最先的 50 上升到最大值 215,最后回落到 115,说明挖掘铲将黄芪挖松抛起,然后随土壤一起下落完成挖掘分离。黄芪平均坐标值最大变化量为 165 mm,最终变化量为 115 mm,变化量越大说明挖掘分离效果越好。

挖掘装置的仿真结果表明,设计的振动挖掘铲入土性能好,对土壤的疏松效果明显,无明显壅土现象,且对黄芪无损伤,达到挖掘装置的设计要求。

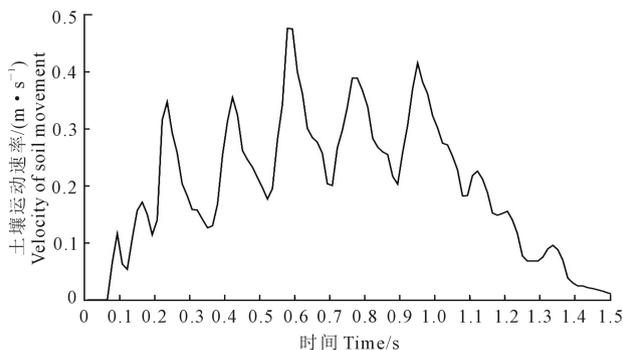


图 15 土壤平均速度随时间变化图线

Fig.15 Soil average velocity with time graph line

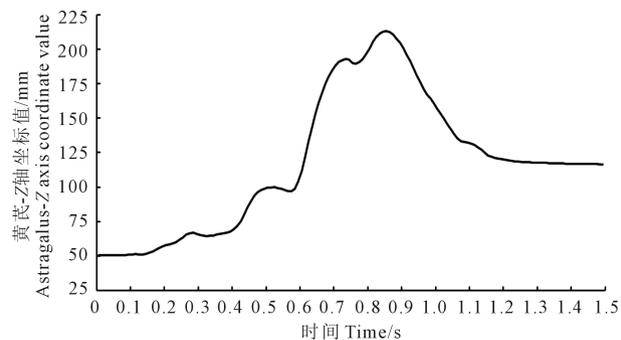


图 17 黄芪根茎 Z 轴平均坐标值随时间变化图线

Fig.17 Astragalus root Z -axis average coordinate value with time graph line

3.2 基于 DEM-Recur Dyn 的药土分离装置仿真分析

3.2.1 模型与参数的建立

挖掘装置作业过的土壤—黄芪模型如图 18 所示。在 SolidWorks 软件中建立药土分离装置三维模型,另存为 $.x_t$ 格式后导入 Recur Dyn,同时给药土分离装置设置运动和接触,主动梅花轮角速度为 $17.6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,药土分离装置前进速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,如图 19 所示。土壤、模型和黄芪的接触参数如表 2 所示。

完成药土分离装置运动设置,进行 EDEM-Recur Dyn 联合仿真,在 Recur Dyn 软件中调节好药土分离装置位置,将模型导入到 EDEM 软件中,进行仿真设置。仿真时间 4 s,时间步长 $1 \times 10^{-5} \text{ s}$,数据保存间隔 0.01 s,设置完成后开始仿真计算。

3.2.2 仿真结果分析

完成药土分离装置 EDEM-Recur Dyn 联合仿真,在 EDEM 软件后处理界面中进行分析。药土分离装置的仿真过程如图 20 所示。

由图 20 可知,在 0.34 s 时药土分离装置开始与土壤接触,随后在整机的向前运动下,挖掘后的药土混合物到达输送链,输送链将药土混合物向后分离输送;在 1.74 s 时经一级输送链作业后的药土混合物分离不彻底,且有少量土壤堆积的现象,其药土混合物掉落到二级输送链上继续分离作业;在 2.8 s 时一部分黄芪已从输送链上掉落,一部分药土混合物正在振动分离,药土混合物在输送链上没有堆积现象;在 3.6 s 时完成药土分离和输送作业,所有黄芪与土壤分离且都输送到整机后的地面上。提取部分黄芪在输送分离过程中的运动轨迹,做出黄芪运动速度随时间变化图线,如图 21 所示。在整个输送过程中黄芪向机组后方运动,速度趋于 $0.2 \sim 1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 1.4 s 和 2.4 s 时黄芪和输送链发生碰撞,速度突变为 $2.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随后又趋于平稳变化,输送链对黄芪根茎的碰撞损伤小。

提取黄芪根茎不同时刻的 X 轴坐标值,做出黄芪根茎 X 轴平均位移量随时间变化图线,如图 22 所示。输送链对黄芪根茎向后分离输送,在 0.5 s 时黄芪位移量开始从 0 匀速变大,在 3.5 s 时停止变化,黄芪最终位移量为 915 mm,分离效果明显,在整个分离输送的过程中,黄芪和土壤在输送链的带动下一起运动,黄芪根茎直接与栅杆的接触较少,对黄芪的碰撞和擦伤较轻,药土混合物在输送链的带动下向后运动,堆积现象不明显,输送分离后的土壤没有埋没黄芪,根茎明显铺放在地面上。

药土分离装置的仿真结果表明,设计的药土分离装置稳定性能好,对土壤和黄芪根茎分离、输送效果明显,无大量药土混合物堆积现象,对黄芪根茎的损伤较小,且能有效地将分离输送的黄芪根茎铺放在地面上,仿真结果达到药土分离装置的设计要求。

4 田间试验

振动分离式根茎类中药材收获机田间性能试验于 2023 年 9 月在甘肃省定西市临洮县洮阳镇柯栳村进行,试验地为平作模式,土壤平均含水量为 14.2%,土壤坚实度为 $7.65 \times 10^5 \text{ Pa}$,挖掘对象为黄

芪,作物平均生长深度为 25.6 cm,株距为 16.2 cm,行距为 20.4 cm。振动分离式根茎类中药材收获机

的配套动力为‘东方红-650’拖拉机,功率为 51.5~58.8 kW。收获机田间试验如图 23 所示。

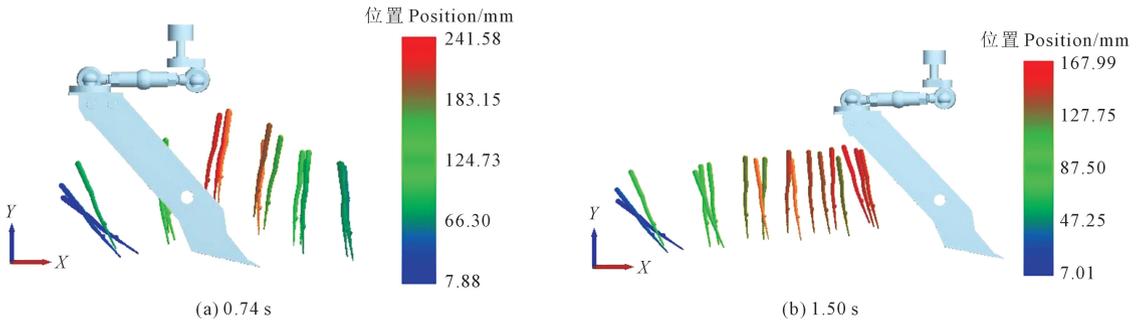


图 16 黄芪位移云图

Fig.16 Cloud map of astragalus root displacement

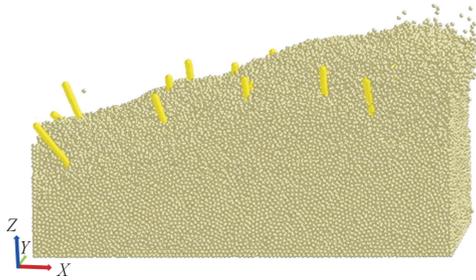


图 18 挖掘后黄芪—土壤模型

Fig.18 Astragalus root-soil model after excavation

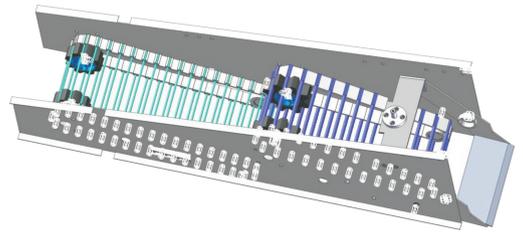


图 19 Recur Dyn 中药土分离装置模型

Fig.19 Medicine-soil separation device in Recur Dyn

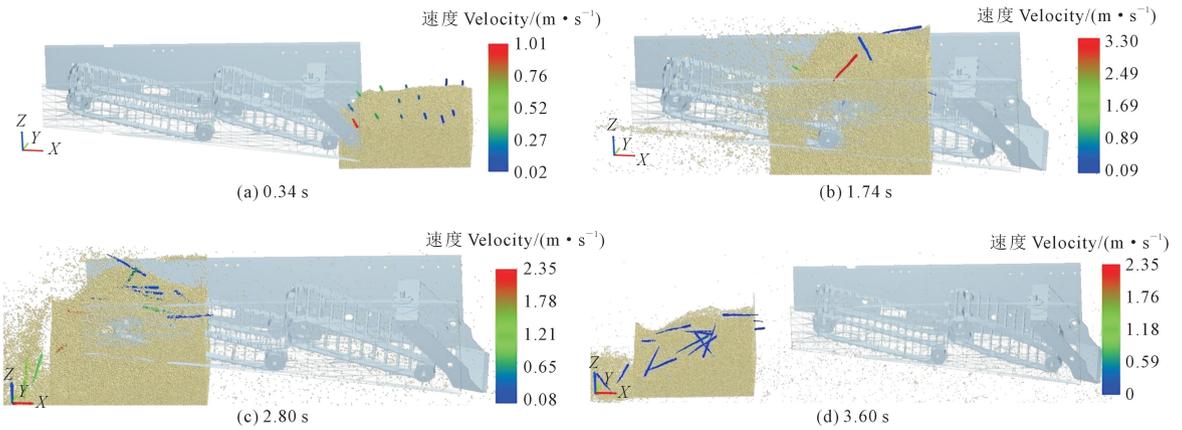
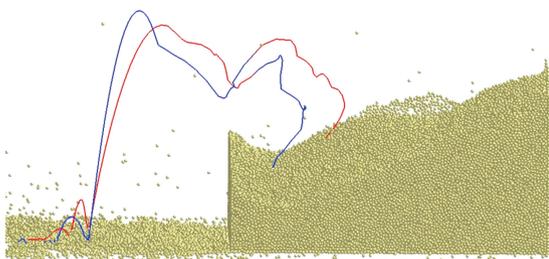
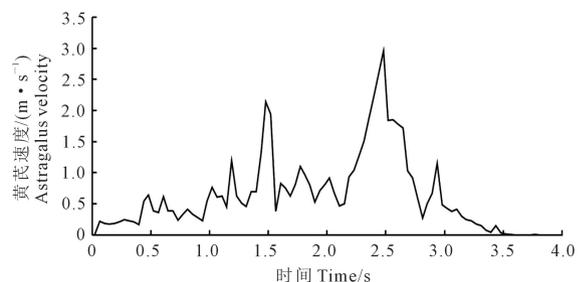


图 20 药土分离装置仿真分析示意图

Fig.20 Schematic diagram of simulation analysis of medicine-soil separation device



(a)黄芪运动轨迹
Astragalus motion trajectory



(b)黄芪运动速度随时间变化图线
Astragalus motion velocity changes with time

图 21 黄芪分离输送运动示意图

Fig.21 Diagram of astragalus separation transport movement

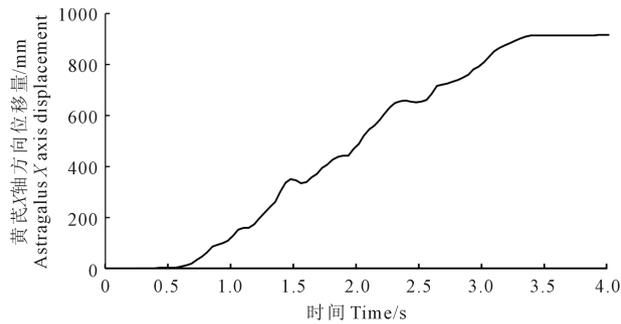


图22 黄芪X轴位移量随时间变化曲线

Fig.22 Changes of astragalus displacement with time



图23 田间试验

Fig.23 Field tests

根据现行标准 NY/T3481-2019《根茎类中药材收获机质量评价技术规程》和农业机械推广鉴定大纲 DG/T189-2019《药材挖掘机》对配套中药材收获机的挖净率、伤损率和挖掘深度进行测定^[34-35]。

在田间随机选取 50 m 的种植区域进行试验检测,两端稳定区不小于 10 m,宽度大于收获机作业幅宽的 8 倍。试验时检测往返两个行程,每个行程随机选取 3 个长为 3 m 的小区,收集各小区内地表的中药材根茎计算挖净率、伤损率,计算方法如下:

$$L_1 = \frac{Q_1}{Q} \times 100\% \quad (6)$$

式中, L_1 为挖净率(%); Q_1 为收获根茎质量(kg); Q 为收获机收集的总根茎质量(kg)。

$$L_2 = \frac{Q_2}{Q} \times 100\% \quad (7)$$

式中, L_2 为伤损率(%); Q_2 为伤损根茎质量(kg)。

挖掘深度计算方法为作业后每个行程测定 11 点,在每点的工作幅宽上测定挖掘深度。在平作地中,挖掘沟底到地表面的垂直距离为挖掘深度。

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (8)$$

式中, H 为挖掘深度平均值(mm); n 为测点点数(个); H_i 为第*i*个点的挖掘深度(mm)。

振动分离式根茎类中药材收获机测试的作业性能试验结果如表 3 所示。

表3 振动分离式根茎类中药材收获机作业性能试验结果

Table 3 Performance test results of vibratory separating rhizome harvester for Chinese medicinal materials

测定指标 Determination index	技术指标 Technical index	测定均值 Measured mean value
挖净率/% Excavation rate	≥95	97.14
伤损率 Wound rate/%	≤5	1.24
挖掘深度 Digging depth /mm	≥200	400

通过田间试验测定的振动分离式根茎类中药材收获机所得的挖净率,伤损率和挖掘深度等试验指标均达到国家和行业标准。设计的收获机具有良好的挖掘效果,可进行根茎类中药材收获作业。

5 结论

1)对振动挖掘装置的整体结构,挖掘铲参数和偏心运动机构进行设计分析。根据挖掘装置的工作原理确定该装置采用偏心传动机构驱动,挖掘铲结构采用平面单铲。

2)对两级药土分离输送装置进行结构设计和分析。两级输送链采用皮带栅杆式,线速度为 $1.15 \sim 1.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,使用摆臂式振动装置,振动频率为 6.6 Hz,一级输送带栅杆直径为 10 mm,间距为 80 mm,二级输送带栅杆直径为 8 mm,间距为 65 mm。

3)对挖掘装置和药土分离装置进行仿真试验。试验结果表明:挖掘装置振动入土,对黄芪和土块向上挖掘和抬升,且最大抬升量为 165 mm,最终黄芪向上位移 115 mm;药土分离装置在输送过程中,有少量土壤堆积现象,最终完成输送,土壤和黄芪完全分离。

4)田间试验表明:振动分离式根茎类中药材收获机作业后,黄芪的挖净率为 97.14%,伤损率为 1.24%,平均挖掘深度为 400 mm,性能试验指标均达到国家行业标准挖净率大于等于 95%、伤损率小于等于 5%的要求。作业期间机具运行平稳,作业指标符合试验标准,满足根茎类药材机械化收获要求。

参考文献:

- [1] 于庆旭,曹光乔,陈彬,等.根茎类中药材收获机械化应用及研究现状[J].中国农机化学报,2022,43(8):15-21.
YU Q X, CAO G Q, CHEN B, et al. Application and research status of harvesting mechanization of Rhizome Chinese herbal medicine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(8): 15-21.
- [2] 王慧,张小波,汪娟,等.2020年全国中药材种植面积统计分析[J].中国食品药品监管,2022,(1):4-9.
WANG H, ZHANG X B, WANG J, et al. Statistical analysis of planting area of Chinese medicinal materials in China in 2020[J]. China Food

- Drug Administration, 2022, (1): 4-9.
- [3] 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.
ZHANG D, ZHANG Z G, CAO Y H, et al. Design and experiment on combined digging shovel of *Panax notoginseng* harvester[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2018, 39(1): 38-44.
- [4] 王荣炎, 郑志安, 高磊, 等. 中药农业机械化收获技术现状及对策[J]. 农机化研究, 2022, 44(7): 1-7.
WANG R Y, ZHENG Z A, GAO L, et al. Current situation and countermeasures of mechanized harvesting technology of traditional Chinese medicine agriculture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(7): 1-7.
- [5] 蔡龙基, 刘克福, 李青涛, 等. 根茎类中药材生产全程机械化发展现状[J]. 农业工程, 2021, 11(12): 9-15.
CAI L J, LIU K F, LI Q T, et al. Current situation of rhizome traditional Chinese medicine production full mechanization[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(12): 9-15.
- [6] 吕金庆, 田忠恩, 吴金娥, 等. 4U1Z 型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 39-47.
LV J Q, TIAN Z E, WU J E, et al. Design and experiment of 4U1Z vibration potato excavator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 39-47.
- [7] 王亨泰, 孙伟, 王建籍, 等. 根茎类中药材仿生挖掘铲的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(1): 243-250.
WANG H T, SUN W, WANG J X, et al. Design and research of bionic digging shovel for rhizome Chinese herbal medicine[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(1): 243-250.
- [8] 张兆国, 薛浩田, 王一驰, 等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 100-111.
ZHANG Z G, XUE H T, WANG Y C, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100-111.
- [9] 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.
CHEN L, QI Y Z, GAO B, et al. Design of excavating device for vibrating herbal rhizome harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(4): 120-127.
- [10] 许渊, 张锋伟, 李保良, 等. 根茎类中药材收获机挖掘装置设计与仿真试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(10): 42-49.
XU Y, ZHANG F W, LI B L, et al. Design and simulation experiment of excavating device of rhizome harvester for Chinese medicinal materials[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(10): 42-49.
- [11] 陈学深, 方贵进, 黄旭楠, 等. 根茎类药材收获机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(8): 61-67, 73.
CHEN X S, FANG G J, HUANG X N, et al. Design and experiment on harvester for rhizome Chinese medicinal herbs[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8): 61-67, 73.
- [12] 张文杰, 魏宏安, 陆祥辉, 等. 4Y-1200 型药材收获机的设计[J]. 甘肃农业大学学报, 2016, 51(5): 116-119.
ZHANG W J, WEI H A, LU X H, et al. Design for 4Y-1200 type medicinal harvester[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2016, 51(5): 116-119.
- [13] 戴飞, 杨杰, 赵武云, 等. 振动式阶梯铲状马铃薯挖掘机作业性能试验[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 263-267.
DAI F, YANG J, ZHAO W Y, et al. Experiment on working performance of potato digger with vibrating type of ladder shovel[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 263-267.
- [14] 王虎存, 张育豪, 孙伟, 等. 振铲式马铃薯挖掘机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(7): 1-5, 20.
WANG H C, ZHANG Y H, SUN W, et al. Design and test of potato digger with vibrating shovel[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(7): 1-5, 20.
- [15] 罗彤娥, 吴建民, 孙伟, 等. 2 种马铃薯挖掘铲的对比分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(3): 121-125.
LUO T E, WU J M, SUN W, et al. Comparison and analysis on two potato digging shovels[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(3): 121-125.
- [16] 赵吉喆. 基于离散元法的马铃薯挖掘铲工作阻力仿真与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
ZHAO J Z. Simulation and experimental investigation of potato digging shovel working resistance based on discrete element method[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [17] 程一启. 三七收获机挖掘装置的仿真与优化试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
CHENG Y Q. Simulation and optimization test of *Panax notoginseng* harvest mining device[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [18] 杨小平, 石林榕, 孙伟, 等. 黄芪振动挖掘机工作参数的优化与试验[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(10): 152-160.
YANG X P, SHI L R, SUN W, et al. Optimization and experiment of the working parameters of a stragalus vibration excavator[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(10): 152-160.
- [19] 王锋, 张锋伟, 杨小平, 等. 黄芪收获机三角平面铲不同倾角挖掘特性研究[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(2): 50-59.
WANG F, ZHANG F W, YANG X P, et al. Research on mining characteristics of triangular plane shovel with different dip angles for *Astragalus* harvester[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(2): 50-59.
- [20] 周梦渊. 黄芪收获机振动挖掘铲的设计与实验[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
ZHOU M Y. Design and experiment of *Astragalus* harvester vibrating shovel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [21] 陈林, 张亚振, 王达, 等. 山丘区根茎类中药材机械化收获技术与装备研究[J]. 河北农机, 2021, (11): 1-2.
CHEN L, ZHANG Y Z, WANG D, et al. Research on mechanized harvesting technology and equipment for roots and stems of traditional Chinese medicine in hilly areas[J]. Hebei Farm Machinery, 2021, (11): 1-2.
- [22] 王年平, 葛宰林, 谭晓丽. 平行四杆机构杆长尺寸误差对机构性能的影响分析[J]. 企业标准化, 2008, (13): 40-41.
WANG N P, GE Z L, TAN X L. Analysis of the influence of the length dimension error of the parallel four bar mechanism on the performance of the mechanism[J]. Enterprise Standardization, 2008, (13): 40-41.
- [23] 窦青青, 孙永佳, 孙宜田, 等. 国内外马铃薯收获机械现状与发展[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9): 206-210.
DOU Q Q, SUN Y J, SUN Y T, et al. Current situation and development of potato harvesting machinery at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 206-210.
- [24] 刘潇, 何彬涛, 段爱国, 等. 振动式马铃薯挖掘装置关键部件设计[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 6-12.
LIU X, HE B T, DUAN A G, et al. Design of key components of vibrating potato excavator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,

- 2020, 41(3): 6-12.
- [25] 杨小平, 魏宏安, 赵武云, 等. 4U1600型集堆式马铃薯挖掘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 83-92.
YANG X P, WEI H A, ZHAO W Y, et al. Design and test of 4U1600 stacking potato excavator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 83-92.
- [26] 史明明, 魏宏安, 胡忠强, 等. 4U-1400型马铃薯联合收获机的设计[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 263-267.
SHI M M, WEI H A, HU Z Q, et al. Design on the 4U-1400 potato combine harvester[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 263-267.
- [27] 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.
WEI H A, WANG D, LIAN W X, et al. Development of 4UFD-1400 potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 11-17.
- [28] 王力. 中药材生产技术综述[J]. 农民致富之友, 2012, (24): 101-102.
WANG L. Overview of production technology for traditional Chinese medicine[J]. Nong Min Zhi Fu Zhi You, 2012, (24): 101-102.
- [29] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 49-56, 77.
DAI F, SONG X F, ZHAO W Y, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 49-56, 77.
- [30] 王锋, 张锋伟, 张陆海, 等. 半夏块茎离散元参数标定与试验验证[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 291-300.
WANG F, ZHANG F W, ZHANG L H, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of *Pinellia ternata* tuber[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(2): 291-300.
- [31] 石林榕, 马周泰, 赵武云, 等. 胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 25-33.
SHI L R, MA Z T, ZHAO W Y, et al. Calibration of simulation parameters of flax seeds using discrete element method and verification of seed-metering test [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 25-33.
- [32] 郝建军, 魏文波, 黄鹏程, 等. 油菜籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 36-44.
HAO J J, WEI W B, HUANG P C, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 36-44.
- [33] 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.
WANG X L, HU H, WANG Q J, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78-85.
- [34] 中华人民共和国农业农村部. 根茎类中药材收获机: 质量评价技术规范: NY/T 3481-2019[S]: 北京: 中国农业出版社, 2019.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Rhizome Chinese medicinal materials harvesters: technical specification of quality evaluation [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.
- [35] 中华人民共和国农业农村部. 药材挖掘机: DG/T 189-2019[S]: 北京: 中国农业出版社, 2019.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Medicinal excavator[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.

(上接第 263 页)

- [22] KATIPOGLU O M. Integration of extreme learning machines with CEEMDAN and VMD techniques in the prediction of the multiscalar standardized runoff index and standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Natural Hazards, 2024, 120(1): 825-849.
- [23] AHMADI F, TOHIDI M, SADRIANZADE M. Streamflow prediction using a hybrid methodology based on variational mode decomposition (VMD) and machine learning approaches[J]. Applied Water Science, 2023, 13: 135.
- [24] 祁继霞, 粟晓玲, 张更喜, 等. VMD-LSTM模型对不同预见期月径流的预测研究[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 258-267.
QI J X, SU X L, ZHANG G X, et al. Research on monthly runoff prediction of VMD-LSTM model in different forecast periods [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 258-267.
- [25] HU H P, ZHANG L M, YAN H C, et al. Denoising and baseline drift removal method of MEMS hydrophone signal based on VMD and wavelet threshold processing[J]. IEEE Access, 2019, 7: 59913-59922.
- [26] CHEN S, REN M, SUN W. Combining two-stage decomposition based machine learning methods for annual runoff forecasting[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126945.
- [27] BAJIC D, JAPUNDZIC-ZIGON N. On quantization errors in approximate and sample entropy[J]. Entropy, 2022, 24(1): 73.
- [28] LI F G, MA G W, CHEN S J, et al. An ensemble modeling approach to forecast daily reservoir inflow using bidirectional long- and short-term memory (Bi-LSTM), variational mode decomposition (VMD), and entropy method[J]. Water Resources Management, 2021, 35(9): 2941-2963.
- [29] IKOTUN A M, EZUGWU A E, ABUALIGAH L, et al. K-means clustering algorithms: a comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data[J]. Information Sciences, 2023, 622: 178-210.
- [30] 王广宇, 解建仓, 张建新. GA-BP组合预测方法在北洛河年径流量预测中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 203-207.
WANG G Y, XIE J C, ZHANG J L. Application of GA-BP combination forecasting method into the annual runoff prediction of Beiluo River[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 203-207.
- [31] TAO L, HE X, WANG R. A hybrid LSSVM model with empirical mode decomposition and differential evolution for forecasting monthly precipitation[J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(1): 159-176.
- [32] 孟志军, 刘淮玉, 安晓飞, 等. 基于SPA-SSA-BP的小麦秸秆含水率检测模型[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 231-238, 245.
MENG Z J, LIU H Y, AN X F, et al. Prediction model of wheat straw moisture content based on SPA-SSA-BP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 231-238, 245.
- [33] SONG C G, YAO L H, HUA C Y, et al. Comprehensive water quality evaluation based on kernel extreme learning machine optimized with the sparrow search algorithm in Luoyang River Basin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(16): 521.