

网络出版时间:2018-05-25 09:43 DOI10.13207/j.cnki.jnwfufu.2018.11.019
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180525.0940.038.html

振动式三七根土分离装置的运动学分析及优化设计

崔振猛,张兆国,王法安,程一启,杨海慧

(昆明理工大学 现代农业工程学院,云南 昆明 650500)

【摘 要】 【目的】设计一种振动式三七根土分离装置,以实现三七根土复合体的根土分离。【方法】将三七根土分离装置简化为曲柄双摇杆机构,并对振动筛上的物料进行运动学分析,确定物料运动的影响因素,验证其运动参数设计的合理性;利用 ADAMS 对该装置进行运动学仿真,选取振动筛前后端点及质心作为研究对象,得到各点的合位移、合速度曲线并分析各曲线的变化规律,验证结构设计的合理性;以人工采挖的三七根土复合体作为试验材料,采用三因素三水平正交组合试验设计,分析各因素对根土分离率及三七损伤率的影响。【结果】在试验参数范围内,通过 Design-Expert 软件得到了最佳的工作组合为:曲柄转速 295 r/min、筛面倾角 8°、筛面长度 620 mm。验证试验表明,最佳组合条件下根土分离率为 95.7%,三七损伤率为 1.9%。【结论】所设计的三七根土分离装置满足设计要求,为后续三七收获机的设计提供了依据。

【关键词】 三七;根土分离;曲柄摇杆机构;运动学分析

【中图分类号】 S225.7⁺9

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2018)11-0146-09

Kinematic analysis and optimal design of vibration-type device for *Panax notoginseng* root-soil separation

CUI Zhenmeng, ZHANG Zhaoguo, WANG Faan, CHENG Yiqi, YANG Haihui

(College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: 【Objective】 This study established a vibrating *Panax notoginseng* root-soil separation device to separate root of *P. notoginseng* and soil from root-soil complex. 【Method】 The *P. notoginseng* root-soil separation device was simplified as a crank double rocker mechanism, and the motion of the material on the vibrating screen was analyzed to find out the factors that affect the movement of the material to verify whether the design was reasonable. The kinematic simulation of the device was carried out by ADAMS, and the front and back points of the vibrating screen and the center of mass were selected as the object of study. The displacement and the speed curve of each point were obtained and the variation of each curve was analyzed to verify the rationality. Artificial mining *P. notoginseng* root-soil complex was selected and orthogonal experiment design with three factors and three levels was used to understand the effects of factors on the separation rate and damage rate of *P. notoginseng*. 【Result】 In the ranges of test parameters, the best combination was obtained by Design-Expert software with the crank speed of 295 r/min, the screen surface incline angle of 8° and the surface length of 620 mm. The verification test showed that the root-soil separation rate was 95.7% and the damage rate of *P. notoginseng* was 1.9%, meeting the design require-

【收稿日期】 2017-08-20

【基金项目】 云南省重点新产品开发项目(2014BC007);云南省科技创新重大专项“克服三七连作障碍技术体系构建及应用”(2016FZ001)

【作者简介】 崔振猛(1992—),男,河南新乡人,在读硕士,主要从事农业机械装备设计与制造研究。

E-mail: zhenmengcui@163.com

【通信作者】 张兆国(1966—),男,山东单县人,教授,博士,主要从事农业机械装备设计与制造研究。

E-mail: zhaoguo Zhang@163.com

seedling seperation device of *Artemisia arborescens* transplanter based on vibration mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(S1): 21-27.

[19] 高筱钧,周金华,赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 20-28.
Gao X J, Zhou J H, Lai Q H. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 20-28.

[20] 杨 怡,廖宇兰,王 涛,等. 自走式木薯收获机的设计 [J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 99-102, 106.
Yang Y, Liao Y L, Wang T, et al. Design of the self-propelled harvester for cassava [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 99-102, 106.

[21] 王家胜,尚书旗. 自走式双行胡萝卜联合收获机的研制及试验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 38-43.

Wang J S, Shang S Q. Development and experiment of double-row self-propelled carrots combine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 38-43.

[22] 陈学深,马 旭,武 涛,等. 虎杖根系脱土滑梳式辊指的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 48-55.
Chen X S, Ma X, Wu T, et al. Design and experiment of slide-combing roller finger for *Polygonum cuspidatum* root-soil separation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 48-55.

[23] 严 伟,胡志超,吴 努,等. 铲筛式残膜回收机输膜机构参数优化与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 31(1): 17-24.
Yan W, Hu Z C, Wu N, et al. Parameter optimization and experiment for plastic film transport mechanism of shovel screen type plastic film residue collector [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 17-24.

(上接第 145 页)

[22] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性 [J]. 中国科学: B 辑, 1987(12): 1309-1316.
Lei X Y. Pore type of loess in China and collapsibility [J]. Science China: Series B, 1987(12): 1309-1316.

[23] 洪宝宁,刘 鑫. 土体微细观结构理论与试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 66-88.
Hong B N, Liu X. Theory and experiment of microstructur, meso-structure of soils [M]. Beijing: Science Press, 2010: 66-88.

[24] Oda M, Nemat-Nasser, Konishi J. Stress induced anisotropy in granular masses [J]. Soils and Foundations, 1985, 25(3): 85-97.

[25] 李广信,张丙印,于玉贞,等. 土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
Li G X, Zhang B Y, Yu Y Z, et al. Soil mechanics [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2013.

ment.【Conclusion】The established device meets the design requirement and provides reference for subsequent design of *P. notoginseng* harvester.

Key words: *Panax notoginseng*; root-soil separation; crank rocker mechanism; kinematic analysis

三七是我国的名贵中药材,有“千年神草”、“金不换”、“南国神草”等美誉,是我国西南地区特有的中草药^[1-2]。近年来,云南省三七产业得到快速发展,其种植面积和产量逐年增大^[3],最新资料显示,2017 年仅文山州的种植面积就已突破 4 万 hm²。但与三七产业迅速发展不相适应的是,目前市场上尚无专门用于三七的收获机械,三七的收获主要靠人工完成,其劳动强度大、效率低、损伤率高^[4]。因此,实现三七机械化收获对三七产业的发展具有重大意义。

在云南三七主产区,三七生长在云南地区特有的黏性土壤中,其块根包括主根、须根,整体根部分布范围宽,须根入土较深,导致三七块根和土壤的粘附力、摩擦力增大,提高了三七块根挖掘及根土分离难度^[5],现有的根茎类作物(如马铃薯、胡萝卜、花生等)收获机械均无法满足三七的收获需求^[6-10]。

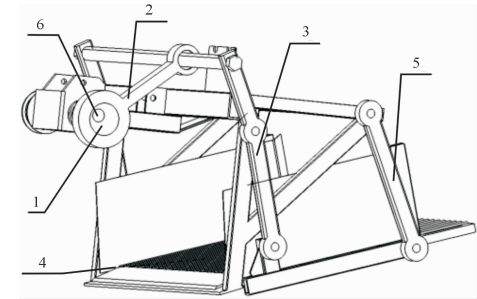
目前,国外尚未见有关三七收获机械的研究报道,国内关于三七收获机械的研究成果也很鲜见,仅有昆明理工大学张兆国等研制的 4N-170 型三七收获机,该机能实现三七根土复合体的挖掘、升运、根土初步分离以及条铺。关于根土分离机构的研究主要集中在花生、马铃薯和玉米根茬等^[11-13],主要采用碾压、击打和抖动等原理实现根土分离^[14-15]。由于三七块根形状不规则,须根脆性大,其块根和土壤的粘附力和摩擦力较大,若使用上述原理研制三七根土分离装置,在三七根土分离时容易出现损伤率高、根土分离效果差等问题。因此,确定三七根土分离装置是研制三七收获机的前提和关键,为此,本研究介绍了一种振动式三七根土分离装置,该装置主要由曲柄摇杆机构及振动筛组成,对振动筛上物料进行运动分析,并对该装置进行 ADAMS 仿真分析以验证其运动及结构参数设计是否合理,以根土分离率和三七损伤率为试验指标进行实验室台架试验,旨在获得最佳的工作参数组合,进而为后续三七收获机械的研究和设计提供科学依据。

1 结构组成与工作原理

1.1 结构组成

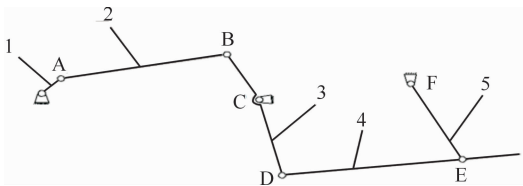
振动式三七根土分离装置主要由振动系统、振动筛、机架组成,其整体结构如图 1 所示,根土分离

装置的结构简图如图 2 所示。工作时,电机带动曲柄 OA 绕主轴旋转,带动连杆 AB,从而使摇杆 BD 绕铰接点 C 来回摆动,使得摇杆 CD、EF 做周转运动,实现振动筛的往复摆动,从而进一步实现三七根土的分离。



1. 偏心盘;2. 连杆;3. 摇杆 I;4. 振动筛;5. 摇杆 II;6. 主轴
1. Eccentric plate;2. Connecting rod;3. Rocker I;
4. Vibration screen;5. Rocker II;6. Spindle

图 1 三七根土分离装置的三维模型
Fig. 1 Three dimensional model of root-soil separation device of *P. notoginseng*



1. 曲柄;2. 连杆;3. 摇杆 I;4. 振动筛;5. 摇杆 II
1. Crank;2. Connecting rod;3. Rocker I;
4. Vibration screen;5. Rocker II

图 2 三七根土分离装置的工作原理简图
Fig. 2 Working principle of root-soil separation device of *P. notoginseng*

通过测绘前期样机,得到曲柄按逆时针旋转。图 2 中曲柄 OA 为 20 mm,连杆 AB 为 220~240 mm,BC 为 170 mm,CD 为 220 mm,EF 为 330 mm,筛面长度分别选取 500,600 和 700 mm。筛面倾角 α 为 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$,通过连杆 AB 来调节。为了提高根土分离率,并且保证三七不会透过筛面,筛孔选择长条形^[16],孔隙大小为 15 mm。

1.2 工作原理介绍

三七根土分离装置安装在三七收获机后方,是整个收获机的重要组成部分,能更进一步实现三七的根土分离。工作时主轴转动驱动偏心盘,实现振

动筛的往复振动,在曲柄摇杆机构的激励作用下,三七根土复合体在筛面上做往复运动并不断向机构末端移动,通过根土复合体跟筛面的往复摩擦,实现三七块茎与土壤的分离,最终将三七块茎从筛面末端排出,完成去土过程。

2 振动筛上物料运动分析

三七根土复合体的运动由振动筛运动产生,所以振动筛的运动分析是筛面物料运动分析的基础。振动筛结构由简化的双摇杆机构组成,振动筛在水平、竖直方向上都有位移,存在相应的极位夹角,在运动中有急回特性。为了研究三七根土复合体在振动筛上的运动性质,又由于振动筛长度与摇杆长度远大于曲柄长度,竖直方向位移较小,所以急回特性可忽略不计。如图 2 所示,振动筛上各点运动与 D 点相同, D 点运动是 B 点运动的放大,放大倍数为 $CD/BC \approx 1$,故认为振动筛做直线往复运动,摆幅 $A = 2r^{[17-19]}$,其中 r 为曲柄半径。将曲柄在最右位置时作为振动筛位移和时间的起始相位,并规定角度以逆时针为正,则振动筛的位移、加速度、速度与时间的关系为:

位移:

$$x = r(\cos \omega t - 1)。(1)$$

速度:

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega \cdot r \cdot \sin \omega t。(2)$$

加速度:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t。(3)$$

式中: r 为曲柄半径, m ; ω 为曲柄角速度, rad/s ; t 为时间, s 。

由以上公式可以看出,影响振动筛运动的主要因素是曲柄转速和曲柄半径,曲柄转速 n 不能取得过高或过低,经过前期多次预试验, n 取 $250 \sim 300 \text{ r/min}$ 。

忽略三七块茎自身的翻滚及其之间的相互碰撞,分析其单个质点在振动筛面上的受力与相对运动状态。假设在筛面上有 1 个质量为 m 的三七根土复合体随振动筛一起运动,那么作用在该复合体上的力有重力 G 、惯性力 P 、物料沿筛面方向的摩擦力 F 以及垂直于筛面的物料法向反力 $N^{[20-22]}$,故当物料沿筛面前、后滑动的极限情况下,其受力如图 3-a、b 所示。

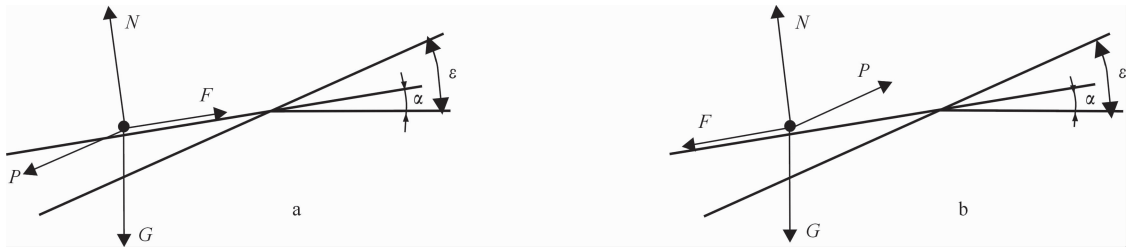


图 3 振动筛上物料沿筛面前、后滑动时的受力分析

Fig. 3 Force analysis of material on vibration screen in the forward and backward slide

根据受力分析,满足物料在筛面上有前滑、后滑、抛离趋势时应分别满足下列条件。

在物料具有前滑趋势时,惯性力方向沿振动方向向下,加速度为正。即:

$$P \cos(\epsilon - \alpha) + G \sin \alpha - F > 0, (4)$$

$$G \cos \alpha + P \sin(\epsilon - \alpha) - N = 0, (5)$$

$$F - Nf = 0, (6)$$

$$f = \tan \varphi。 (7)$$

式中: α 为筛面倾角, $(^\circ)$; ϵ 为摆动方向角,取 28° ; f 为滑动摩擦系数; φ 为三七根土复合体与筛面的摩擦角,预试验测得 φ 为 24° 。

合并上式,得:

$$\omega^2 r \cos \omega t \cos(\epsilon - \alpha + \varphi) > g \sin(\varphi - \alpha)。 (8)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 。

因 $-1 \leq \cos \omega t \leq 0$, 故有:

$$\frac{\omega^2 r}{g} > 0.478 \geq \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\cos(\epsilon - \alpha + \varphi)} = K_{\text{前}} \geq 0.354。 (9)$$

式中: $K_{\text{前}}$ 为三七根土复合体前滑临界条件下 $\omega^2 r$ 与 g 的比值。

同理,三七根土复合体有向后滑动趋势且未跃起时,有:

$$P \cos(\epsilon - \alpha) - G \cos \alpha - F > 0, (10)$$

$$P \sin(\epsilon - \alpha) + N = G \cos \alpha, (11)$$

$$F - Nf = 0, (12)$$

$$f = \tan \varphi。 (13)$$

合并得:

$$\omega^2 r \cos \omega t \cos(\epsilon - \alpha - \varphi) > g \sin(\varphi + \alpha)。 (14)$$

因 $0 \leq \cos \omega t \leq 1$, 所以得:

$$\frac{\omega^2 r}{g} > 0.578 \geq \frac{\sin(\varphi + \alpha)}{\cos(\epsilon - \alpha - \varphi)} = K_{\text{后}} \geq 0.516.$$

(15)

式中: $K_{\text{后}}$ 为三七根土复合体后滑临界条件下 $\omega^2 r$ 与 g 的比值。

物料抛离筛面的条件是:

$$N = G \cos \alpha - P \sin(\epsilon - \alpha) < 0.$$

(16)

将 $P = m\omega^2 r \cos \omega t$ 代入上式,得:

$$\frac{\omega^2 r}{g} > 3.187 \geq \frac{\cos \alpha}{\sin(\epsilon - \alpha)} = K_{\text{抛}} \geq 2.655.$$

(17)

式中: $K_{\text{抛}}$ 为三七根土复合体被抛起临界条件下 $\omega^2 r$ 与 g 的比值。

由上述分析可知:振动筛上物料的运动形式主要取决于运动参数 $\omega^2 r$ 和振动筛倾角 α ,为了保证三七的根土分离效率,并且避免三七块根的损伤,三七根土复合体只能跟筛面发生向前或向后滑动,且不能被抛离振动筛,因此曲柄转速 n 的设计必须满足 $127 \text{ r/min} \leq n \leq 348 \text{ r/min}$,由此可知该振动筛运

动参数的设计满足要求。

3 三七根土分离装置的仿真分析

3.1 仿真模型的建立

按照样机结构尺寸应用 Pro/e 软件建立三维模型,转化为中间格式后导入 Adams/View 中,对各个零件进行材料赋予、约束添加,建立仿真模型。在 Adams/View 环境下对机器进行仿真,得到振动筛质心及筛面前、后端点的合位移及合速度图像,观察其变化规律,结合理论分析判断其结构设计的合理性。

3.2 仿真分析

设仿真时间为 0.5 s,步数为 100,曲柄转速为 300 r/min,筛面长度取 600 mm,筛面倾角 α 取 8° ,振动筛质心及筛面前端点、后端点的合位移、合速度图像如图 4-a、b 所示。由图 4 可知,振动筛上各点从前到后的位移、速度变化趋势相同。各点位移变化均值及速度变化区间如表 1 所示。

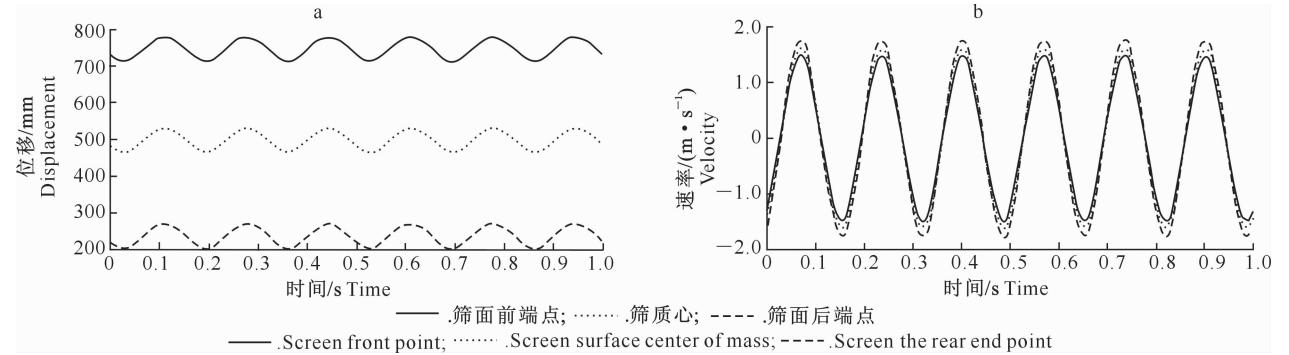


图 4 振动筛质心及筛面前端点、后端点合位移与合速度变化曲线

Fig. 4 Displacement and velocity variation of screen surface center of mass and screen front point and rear end point

表 1 振动筛上物料位移均值及速度的变化

Table 1 Material displacement mean and velocity interval

位置 Position	位移/mm Displacement	速度/(m·s ⁻¹) Velocity
振动筛前端点 Front of vibrating screen	35.25	-1.80~1.80
振动筛质心 Centroid of vibrating screen	33.96	-1.65~1.65
振动筛后端点 Rear end of vibrating screen	32.54	-1.50~1.50

由表 1 可知,振动筛各点位移、速度从前到后依次减小,位移的逐渐减小保证了三七根土复合体顺利向后方输送,速度的逐渐减小有利于实现三七根土复合体的根土分离,同时降低了对三七的损伤。

4 试验设计及参数优化

4.1 试验材料

试验材料为云南文山七丹药业 GAP 工厂经人工挖掘收获的三七根土复合体(图 5),经测定土壤

含水率为 17.5%。



图 5 三七根土复合体实体图

Fig. 5 Entity picture of *P. notoginseng* root-soil complex

4.2 试验装置

根据上述分析,为了方便进行实验室台架试验,

建立台架试验装置如图 6 所示,该装置主要由机架、振动筛、振动系统、三相异步电机、变频器等组成。

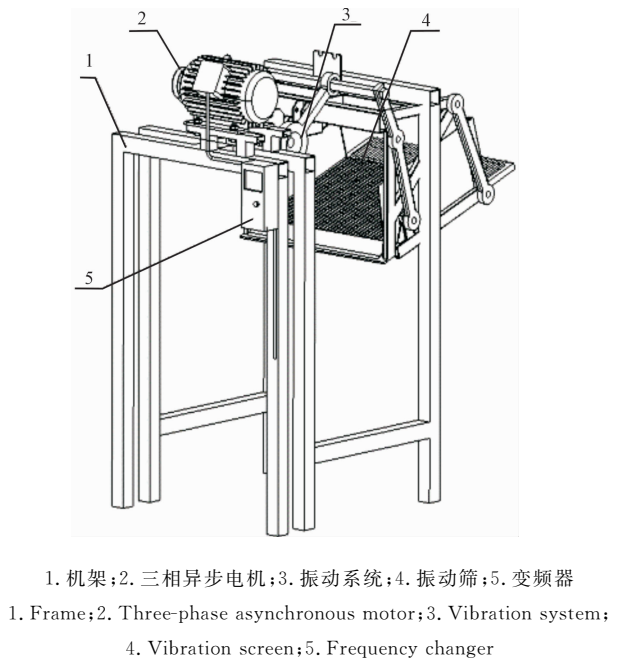


图 6 三七根土分离试验台架三维模型
Fig. 6 Three dimensional model of test bench of separation for *P. notoginseng* root-soil complex

4.3 试验指标

根据三七生产实际要求,以三七根土分离率与三七损伤率为考察指标,分析该根土分离装置的工作性能。

(1)根土分离率。计算公式为:

$$y_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_2} \times 100\%.$$
 (19)

式中: y_1 为根土分离率,%; m_1 为投入台架试验装置前土壤与三七混合物的总质量,kg; m_2 为经过台架试验装置后土壤与三七的总质量,kg; m_3 为不含残余土壤的干净三七根的总质量,kg。

(2)三七损伤率。用来反映试验过程中三七块根根根表皮破损或须根折断情况。其计算公式为:

$$y_2 = \frac{t_1}{t_0} \times 100\%.$$
 (20)

式中: y_2 为三七损伤率,%; t_1 为经过试验装置后有损伤的三七个数; t_0 为经过试验装置的三七总数。

4.4 试验方法

由第二章理论分析可知,影响三七根土混合物运动的主要因素是曲柄转速、筛面倾角,同时考虑到筛面长度对去土效率的影响,筛面过短会导致去土效率低,同时筛面过长会导致物料不能顺利向振动筛后方移动,因此选取曲柄转速 n 、筛面倾角 α 、筛面长度 l 作为影响因素,试验装置如图 7 所示。

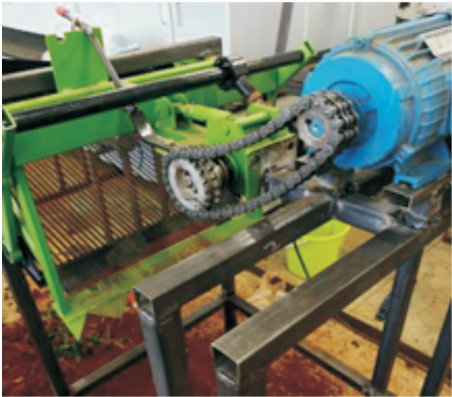


图 7 三七根土复合体分离试验台架实体图
Fig. 7 Entity picture of separation test bench of *P. notoginseng* root-soil complex

通过前面的预试验与理论分析,曲柄转速分别确定为 250,275 和 300 r/min,所涉及的振动筛筛面倾角分别为 6°,8°,10°,筛面长度分别取 500,600 和 700 mm,将 2.2 kW 三相异步电机的调整范围设定为 100~1 000 r/min,通过改变以上 3 个组合因素优化根土分离率与三七损伤率,利用 Design-Expert 软件设计三因素三水平正交组合试验,其中包括 5 组误差估算组合与 12 组析因组合^[23]。因素水平方案见表 2,试验方案与试验结果见表 3。

表 2 三七根分离正交试验的因素水平方案

Table 2 Factor and level scheme of orthogonal test to root-soil separation of *P. notoginseng*

水平 Level	曲柄转速(x_1)/ (r · min ⁻¹) Crank speed	筛面倾角(x_2)/(°) Inclination of screen surface	筛面长度(x_3)/mm Screen length
—1	250	6	500
0	275	8	600
1	300	10	700

表 3 三七根土分离正交试验方案及试验结果

Table 3 Test scheme and result of orthogonal test to root-soil separation of *P. notoginseng*

试验序号 No.	x_1	x_2	x_3	根土分离率(y_1)/% Root-soil separation rate	三七损伤率(y_2)/% <i>Panax</i> damage rate
1	0	1	1	90.0	2.7
2	0	0	0	95.0	1.7
3	1	0	1	92.8	2.4
4	0	—1	1	90.5	3.3

表 3(续) Continued table 3

试验序号 No.	x_1	x_2	x_3	根土分离率(y_1)/% Root-soil separation rate	三七损伤率(y_2)/% <i>Panax</i> damage rate
5	0	0	0	96.1	1.9
6	1	-1	0	92.8	3.0
7	-1	0	1	91.5	2.8
8	-1	-1	0	88.2	4.1
9	0	0	0	96.4	2.0
10	0	0	0	95.9	1.8
11	0	0	0	95.5	1.7
12	-1	1	0	91.6	3.4
13	0	1	-1	91.5	3.1
14	1	1	0	93.8	3.5
15	1	0	-1	90.5	3.4
16	-1	0	-1	88.7	4.0
17	0	-1	-1	87.8	3.9

4.5 正交试验结果分析 可得三七根土分离率及三七损伤率的分析结果如表 4.5.1 方差分析 对正交试验结果进行方差分析， 4,5 所示。

表 4 三七根土分离率正交试验结果的方差分析

Table 4 Variance analysis of *P. notoginseng* root-soil separation rate of the orthogonal test results

方差来源 Sources of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
模型 Model	123.05	9	13.67	19.22	0.000 4
x_1	12.25	1	12.25	17.22	0.004 3
x_2	7.22	1	7.22	10.15	0.015 4
x_3	4.96	1	4.96	6.97	0.033 4
x_1x_2	1.44	1	1.44	2.02	0.197 8
x_1x_3	0.06	1	0.06	0.09	0.775 5
x_2x_3	4.41	1	4.41	6.20	0.041 6
x_1^2	11.15	1	11.15	15.67	0.005 5
x_2^2	27.43	1	17.43	38.56	0.000 4
x_3^2	45.23	1	45.23	63.57	0.000 1
残差 Residual	4.98	7	0.71		
失拟 Lack of fit	3.79	3	1.26	4.26	0.097 8
误差 Pure error	1.19	4	0.30		
总和 Cor total	128.04	16			

表 5 三七损伤率正交试验结果的方差分析

Table 5 Variance analysis on the damage rate of *P. notoginseng* of the orthogonal test results

方差来源 Sources of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
模型 Model	10.26	9	1.14	23.43	0.000 2
x_1	0.78	1	0.78	16.06	0.005 1
x_2	0.32	1	0.32	6.58	0.037 3
x_3	0.91	1	0.91	18.73	0.003 4
x_1x_2	0.36	1	0.36	7.40	0.029 7
x_1x_3	0.12	1	0.12	2.52	0.156 5
x_2x_3	0.01	1	0.01	0.21	0.664 0
x_1^2	2.23	1	2.23	45.81	0.000 3
x_2^2	3.82	1	3.82	78.53	0.000 1
x_3^2	0.96	1	0.96	19.74	0.003 0
残差 Residual	0.34	7	0.05		
失拟 Lack of fit	0.27	3	0.091	5.34	0.069 6
误差 Pure error	0.07	4	0.017		
总和 Cor total	10.60	16			

表 4 方差分析结果表明,因子 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_2x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 对 y_1 影响显著,其他因子影响不显著。

整体模型的 P 值为 0.000 4, 而失拟项的 P 值为 0.097 8, 说明失拟项影响不显著, 回归模型极其显著。各因素对根土分离率的影响顺序依次为 $x_1 > x_2 > x_3$ 。

去除不显著项后, 得到三七根土分离率 y_1 的二次多元回归方程为:

$$y_1 = 95.78 + 1.24x_1 + 0.95x_2 + 0.79x_3 - 1.05x_2x_3 - 1.63x_1^2 - 2.55x_2^2 - 3.28x_3^2 \quad (21)$$

表 5 方差分析结果表明, 因子 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 对 y_2 影响显著, 其他因子影响不显著。整体模型的 P 值为 0.000 2, 而失拟项的 P 值为 0.069 6, 说明失拟项影响不显著, 回归模型极其显著。各因素对三七损伤率的影响顺序依次为 $x_3 > x_1 > x_2$ 。

去除不显著项后, 得到三七损伤率 y_2 的二次多元回归方程为:

$$y_2 = 1.82 - 0.31x_1 - 0.20x_2 - 0.34x_3 + 0.30x_1x_2 + 0.73x_1^2 + 0.95x_2^2 + 0.48x_3^2 \quad (22)$$

4.5.2 响应曲面分析 应用响应曲面法分析各因

素对三七根土分离率及三七损伤率的影响。由公式 (21) 及表 4 方差分析结果可知, 筛面长度和筛面倾角对三七根土分离率的影响有交互作用, 其余因素组合对三七根土分离率无交互影响。当固定曲柄转速为 275 r/min 时, 筛面倾角和筛面长度对根土分离率的交互作用的响应曲面如图 8 所示。由图 8 可知, 在试验水平下筛面倾角对根土分离率的影响略较筛面长度显著; 根土分离率随着筛面长度的增大先增大后减小, 减小幅度大于增大幅度, 随着筛面倾角的增大同样先增大后减小, 但减小幅度小于增大幅度。

由公式 (22) 及表 5 方差分析结果可知, 曲柄转速和筛面倾角对三七损伤率的影响有交互作用, 其余因素组合对三七损伤率无交互影响。当固定筛面长度为 600 mm 时, 曲柄转速和筛面倾角对三七损伤率的交互作用的响应曲面如图 9 所示。由图 9 可知, 在试验水平下曲柄转速对三七损伤率的影响略较筛面倾角显著; 三七损伤率随着曲柄转速和筛面倾角的增大均呈先减小后增大趋势, 且减小幅度均大于增大幅度。

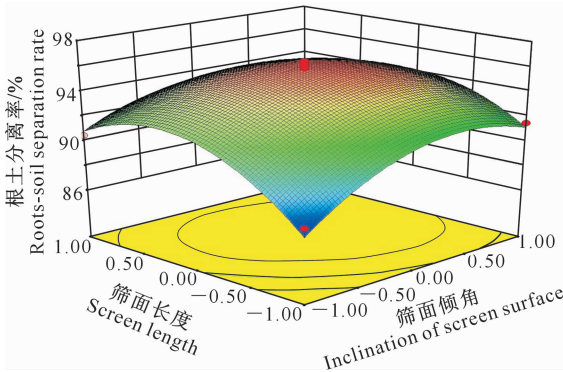


图 8 筛面倾角和筛面长度对三七根土分离率的交互作用
Fig. 8 Interaction of inclination of screen surface and screen length on root-soil separation rate of *P. notoginseng*

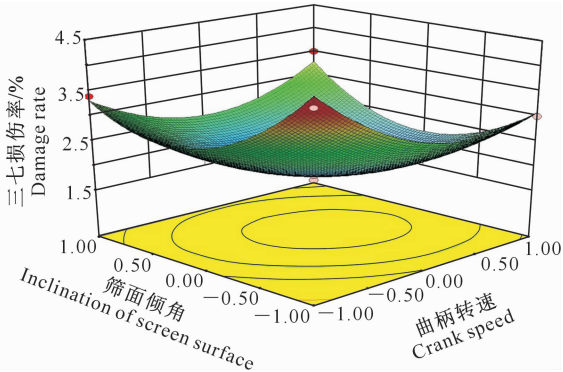


图 9 曲柄转速和筛面倾角对三七损伤率的交互作用
Fig. 9 Interaction of crank speed and inclination of screen surface on the damage rate of *P. notoginseng*

4.6 试验验证

为保证根土分离率在 95% 以上且三七损伤率在 2.0% 以下, 利用 Design-Expert 软件分析确定台架试验的最优因素组合, 对其进行圆整后得到最优组合为: 曲柄转速为 295 r/min、筛面倾角为 8°、筛面长度为 620 mm。验证试验在图 6 的试验台架上完成, 为减小试验误差共进行了 15 组重复试验。试验结果表明, 筛净率最大值为 96.5%, 最小值为 93.6%, 平均值为 95.7%; 三七损伤率最大值为 2.3%, 最小值为 1.4%, 平均值为 1.9%。该结果表明, 所确定的最优参数组合满足设计要求。

5 结 论

对三七根土分离装置进行运动学及动力学分析, 并利用 ADAMS 对该装置进行运动学仿真, 验证了该装置运动参数、整体结构设计的合理性。

以三七根土复合体作为试验材料, 采用三因素三水平正交组合试验设计, 分析振动筛运动影响因素, 得到各因素对三七根土分离率的影响顺序为曲柄转速、筛面倾角和筛面长度, 对三七损伤率的影响顺序为筛面长度、曲柄转速、筛面倾角。响应曲面分析表明, 筛面倾角和筛面长度对三七根土分离率有

交互作用,曲柄转速和筛面倾角对三七损伤率有交互作用。在试验参数范围内通过 Design-Expert 软件得到振动筛的最佳工作组合为:曲柄转速 295 r/min、筛面倾角 8° 、筛面长度 620 mm。验证试验表明,在此条件下三七根土分离率为 95.7%,且三七损伤率仅为 1.9%,完全满足设计要求,这为三七收获机械的设计奠定了基础。

[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.
Lu R M, Huang Z Q, Li B, et al. Chemical constituents of *Notoginseng* Radix et Rhizoma [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2016, 22(7): 62-64.
- [2] 李 娟,王如锋,杨 莉,等.三七皂苷类成分及对心血管作用的研究进展[J].中国中药杂志,2015,40(17):3480-3487.
Li J, Wang R F, Yang L, et al. Structure and biological action on cardiovascular systems of saponins from *Panax notoginseng* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2015, 40(17): 3480-3487.
- [3] 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(S1):234-240.
Zhang Z G, Wang F A, Zhang Y C, et al. Design and experiment of self-propelled *Panax notoginseng* harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(S1): 234-240.
- [4] 赵菲菲.牵引式三七收获机的设计与试验[D].昆明:昆明理工大学,2016.
Zhao F F. The tractive *Notoginseng* harvester design and experimental research [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [5] 张文杰.4Y-1200 型药材收获机设计与研究[D].兰州:甘肃农业大学,2015.
Zhang W J. Design and research for 4Y-1200 type of the rhizome Chinese herbal medicines harvester [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015.
- [6] Butler G P. Mechanization of potato grading on small-scale farms: a case study from Peru [J]. Experimental Agriculture, 2005, 41(1): 81-92.
- [7] 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.
Lü J Q, Tian Z E, Wu J E, et al. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 39-47.
- [8] 尚书旗,周亚龙,王晓燕,等.三种花生收获机的作业性能对比试验研究[J].农业工程学报,2008,24(6):150-153.
Shang S Q, Zhou Y L, Wang X Y, et al. Comparative experimental study on working performance of three kinds of peanut harvesters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 150-153.
- [9] 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.
Jin X, Du X W, Wang S G, et al. Design and experiment of stems cutting device for carrot harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 82-89.
- [10] 陈学深,马 旭,陈国锐,等.深根茎类中药材根土分离装置的研究[J].机械设计,2015,32(7):65-70.
Chen X S, Ma X, Chen G R, et al. Research on soil-rhizome separating device of deep-rhizome Chinese herbal medicines [J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(7): 65-70.
- [11] 武 涛,马 旭,齐 龙,等.玉米根茬根土分离装置[J].农业机械学报,2014,45(6):133-139.
Wu T, Ma X, Qi L, et al. Roots-soil separating device of corn stubble [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 133-139.
- [12] 权龙哲,张 丹,曾百功,等.玉米根茬抖动升运机构的建模与优化[J].农业工程学报,2013,29(3):23-29.
Quan L Z, Zhang D, Zeng B G, et al. Modeling and optimizing dither mechanism for conveying corn stubble [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 23-29.
- [13] 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.
Song J, Qiu S L, Wang X Z. Design and test on 4B-1200 type *Bulbus fritillariae* ussuriensis medicinal material harvester [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 34-41.
- [14] 李立君,胡文字,高自成,等.曲柄摇杆振动破壳油茶果粗选机运动学分析及试验[J].农业工程学报,2016,34(7):28-35.
Li L J, Hu W Y, Gao Z C, et al. Kinematics analysis and experiment of crank rocker vibrating coarse sorting machine for unshelled oil-tea fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 28-35.
- [15] 贾晶霞,张东兴.马铃薯收获机摆动筛与块茎运动仿真分析[J].中国农业大学学报,2006,11(3):79-82.
Jia J X, Zhang D X. Moving simulation analysis on swing sieve of potato harvester [J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(3): 79-82.
- [16] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等.拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(7):119-126.
Yang R B, Yang H G, Shang S Q, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119-126.
- [17] 张 璋,赵 刚,江 亚,等.三重分筛式半夏收获机设计[J].农机化研究,2015(12):130-134.
Zhang Z, Zhao G, Jiang Y, et al. Design of new energy saving *Pinellia* tuber harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(12): 130-134.
- [18] 汲文峰,吴启明,黄海东,等.基于振动机理的藜蒿扦插机分苗机构设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(S1):21-27.
Ji W F, Wu Q M, Huang H D, et al. Design and experiment of

seedling seperation device of *Artemisia arborescens* transplanter based on vibration mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(S1): 21-27.

[19] 高筱钧,周金华,赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 20-28.
Gao X J, Zhou J H, Lai Q H. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 20-28.

[20] 杨 怡,廖宇兰,王 涛,等. 自走式木薯收获机的设计 [J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 99-102, 106.
Yang Y, Liao Y L, Wang T, et al. Design of the self-propelled harvester for cassava [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 99-102, 106.

[21] 王家胜,尚书旗. 自走式双行胡萝卜联合收获机的研制及试验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 38-43.

Wang J S, Shang S Q. Development and experiment of double-row self-propelled carrots combine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 38-43.

[22] 陈学深,马 旭,武 涛,等. 虎杖根系脱土滑梳式辊指的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 48-55.
Chen X S, Ma X, Wu T, et al. Design and experiment of slide-combing roller finger for *Polygonum cuspidatum* root-soil separation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 48-55.

[23] 严 伟,胡志超,吴 努,等. 铲筛式残膜回收机输膜机构参数优化与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 31(1): 17-24.
Yan W, Hu Z C, Wu N, et al. Parameter optimization and experiment for plastic film transport mechanism of shovel screen type plastic film residue collector [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 17-24.

(上接第 145 页)

[22] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性 [J]. 中国科学: B 辑, 1987(12): 1309-1316.
Lei X Y. Pore type of loess in China and collapsibility [J]. Science China: Series B, 1987(12): 1309-1316.

[23] 洪宝宁,刘 鑫. 土体微细观结构理论与试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 66-88.
Hong B N, Liu X. Theory and experiment of microstructur, meso-structure of soils [M]. Beijing: Science Press, 2010: 66-88.

[24] Oda M, Nemat-Nasser, Konishi J. Stress induced anisotropy in granular masses [J]. Soils and Foundations, 1985, 25(3): 85-97.

[25] 李广信,张丙印,于玉贞,等. 土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
Li G X, Zhang B Y, Yu Y Z, et al. Soil mechanics [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2013.