doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.04.010

马铃薯收获机扰动分离装置设计与试验

王兴欢[1]　魏忠彩[1,2]　苏国梁[3,4]　孟鹏祥[3,4]　王法明[3,4]
张祥彩[1]　王宪良[1]　程修沛[1]　李志合[1]　金诚谦[1,2]
（1.山东理工大学农业工程与食品科学学院，淄博 255091；2.农业农村部南京农业机械化研究所，南京 210014；
3.山东思代尔农业装备有限公司，德州 253600；4.山东省马铃薯生产装备智能化工程技术研究中心，德州 253600）

摘要：针对现有的小型马铃薯收获机筛面土块破碎效果不佳而影响分离效率和收获品质等问题，结合北方马铃薯主产区收获模式和常用杆条式分离装置，设计了一款马铃薯收获机扰动分离装置。在阐述总体结构及工作原理基础上，结合马铃薯的碰撞特性和土块的破碎过程分析，得到影响薯块损伤和土块破碎的主要因素为扰动深度、偏心轮转速和偏心距；通过 EDEM－RecurDyn 耦合构建仿真模型，单因素试验得到扰动杆数量最优为 4，以扰动深度、偏心轮转速和偏心距为试验因素，以马铃薯碰撞力和土块破碎率为评价指标，运用 Box－Behnken 中心组合设计方法进行仿真试验，对试验结果进行方差分析，利用响应面分析了各交互因素对试验指标的影响规律，结合实际工况确定影响因素最佳取值。验证试验表明：当收获机分离筛运行速度为 0.7 m/s、扰动深度为 51.5 mm、偏心轮转速通过调速器设为 2.3 r/s、偏心距为 31 mm 时，土块破碎率为 60.7%，电子马铃薯采集的碰撞加速度峰值平均值为 790.66 m/s^2，小于马铃薯临界损伤阈值。

关键词：马铃薯收获机；薯土分离装置；扰动分离装置；耦合仿真
中图分类号：S225.7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)04-0101-12　　**OSID**：

Design and Experiment of Simple Harmonic Disturbance Separation Device for Potato Harvester

WANG Xinghuan[1]　WEI Zhongcai[1,2]　SU Guoliang[3,4]　MENG Pengxiang[3,4]　WANG Faming[3,4]
ZHANG Xiangcai[1]　WANG Xianliang[1]　CHENG Xiupei[1]　LI Zhihe[1]　JIN Chengqian[1,2]
(1. *School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255091, *China*
2. *Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*
3. *Shandong Star Agricultural Equipment Co., Ltd., Dezhou* 253600, *China*
4. *Shandong Provincial Intelligent Engineering and Technology Research Center for Potato Production Equipment, Dezhou* 253600, *China*)

Abstract: Combined with the harvesting mode and frequently-used rod-type separation devices in the main potato production areas of northern China, a disturbance separation device for potato harvester was designed to solve the problems of the poor soil fragmentation efficiency and harvest quality which existed in small-scale potato harvesters. On the basis of explaining the overall structure and working principle, combined with the analysis of the collision characteristics of potatoes and the fragmentating process of soil, the main factors which affected the the damage of potatoes and soil fragmentating were obtained. A simulation model was built through EDEM－RecurDyn coupling. The optimal number of disturbance rods obtained from single factor experiments was 4. The experimental factors were disturbance depth, eccentric wheel rotary speed, and eccentricity, and the collision force of potatoes and soil fragmentation rate were used as evaluation indicators. The method of Box－Behnken central combination design was used to conduct simulation experiments and work at the variance analysis on the experimental results. The

收稿日期：2024－01－26　修回日期：2024－02－20
基金项目：国家自然科学基金项目(52105266)、山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2021TSGC1332)、山东省高等学校青创科技支持计划项目(2023KJ152)和中国博士后科学基金面上项目(2021M701801)
作者简介：王兴欢(1999—)，男，硕士生，主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究，E-mail：1192594035@qq.com
通信作者：魏忠彩(1990—)，男，副教授，博士，主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究，E-mail：weizc@sdut.edu.cn

response surface methodology was used to analyze the influence of various interaction factors on the experimental indicators. The optimum value of the influencing factors was determined based on actual operating conditions. The experiment showed that when the operating speed of the separating sieve of the harvester was 0.7 m/s, the disturbance depth was 51.5 mm, the rotary speed of the eccentric wheel was 2.3 r/s set by the governor and the eccentricity was 31 mm, the fragmentation rate of soil was 60.7%, and the average of the peak impact acceleration values collected by the impact recording device was 790.66 m/s^2. Both were below the critical damage threshold of potatoes.

Key words: potato harvester; potato soil separation device; disturbance separation device; coupling simulation

0 引言

机械化收获是马铃薯全程机械化的薄弱环节和短板,薯土分离装置是马铃薯收获机的核心部件,直接影响分离性能和收获品质,由于种植区域和土壤特性差异大等因素,机收过程中配备的薯土分离装置结构和原理各不相同[1-3]。薯土分离装置的主要作用是对挖掘的薯-土-杂混合物进行高效分离,主要包括辊组输送式[4]、摆动筛式[5]、拨辊推送式[6]、滚筒分离式[7]、环形分离装置[8]和振动分离式[9]等结构形式,其中辊组输送式结构是利用圆辊对马铃薯表面的摩擦作用,迫使薯块和表面泥土分离,实现清土除杂作用[10-11];振动分离式结构通过振动装置对分离筛筛面施加一定的激振频率和幅度,土块在激振作用下透筛分离[12]。

由于国内马铃薯主产区种植模式和种植农艺的差异性,马铃薯收获机薯土分离装置的结构和作业原理有所区别[13-15],例如多段分离马铃薯联合收获机的摆抖薯土分离装置采用偏心轮与摇臂相结合的结构形式,双胶轮交替击打筛面,且可根据薯土比例调节振动频率和振动幅度,以最大程度降低含杂率和伤薯率[9];多级分离缓冲马铃薯收获机采用主动振动+被动振动相结合的方式,主动振动配合微波浪筛面既实现了土块破碎,又降低了薯块损伤[16];拨辊推送式分离装置采用3齿拨轮结构,利用薯杂混合物在拨轮间的滑动、滚动和跳跃运动实现薯杂分离[6];低位铺放双重缓冲马铃薯收获机采用4胶轮+2主动振动轴机构,胶轮对筛面施加高频低幅振动,通过2支撑胶轮的角度调节筛面的振动幅度和筛面角度,降低薯块的振动损伤[17];立式环形分离输送装置利用弹性绳+间隔格栅结构形式,既实现了清土除杂又可防止薯块掉落和回流[8]。

为实现高效低损薯-土-杂分离,国外在马铃薯收获机分离装置材料、结构和作业参数精准调控等方面开展了相关研究,形成了种类和功能较为全面的分离装置[18-22],例如美国973型马铃薯联合收获机的星型六齿拨动式辊轴组提高了薯土混合物的碰撞频率,聚氨酯材料降低了对薯块的表皮擦伤,以实现高效分离和低损收获[23],德国Grimme Varitron系列自走式马铃薯联合收获机可根据薯土量自动调节分离筛和振动器的运行速度,结合SE原理实现低损装车[24],日本TPH7系列马铃薯收获机薯土分离阶段的杆条粗细交替布置,提高了激振装置的振动能力[23]。

本文在前期马铃薯收获试验的基础上,结合马铃薯种植农艺及北方马铃薯主产区收获实际需求,基于简谐扰动碎土原理设计一款简谐扰动薯土分离装置,对薯杂混合物低损扰动的同时对土块产生一定的破碎解聚作用,与安装在分离筛下方的振动装置不冲突,为提升马铃薯收获机分离效率提供技术参考。

1 整机结构与工作原理

结合国内马铃薯种植区土壤特性和马铃薯收获捡拾装袋装箱的收获工艺特点,马铃薯收获机主要由机架、行走履带、分离筛、扰动分离装置、对行装置和挖掘铲等组成,将设计的扰动分离装置安装在履带自走式马铃薯收获机分离筛上方,如图1所示。

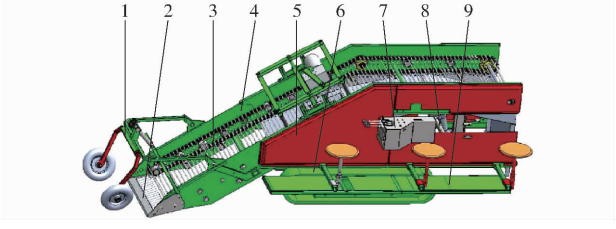


图1 马铃薯收获机整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of potato harvester

1. 对行装置 2. 挖掘铲 3. 分离筛 4. 机架 5. 扰动分离装置 6. 行走履带 7. 操作平台 8. 发动机仓 9. 分拣平台

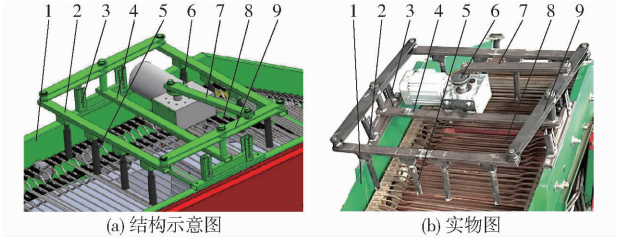
收获作业时,对行装置的2个对行轮压在薯垄两侧,引导机具沿着薯垄前进,当薯杂混合物被输送至扰动分离装置下方时,扰动分离装置对薯杂混合物施加扰动作用,部分土块解聚分离掉落,剩余薯杂混合物被输送至分离筛末端,位于分拣平台两侧的捡拾工捡拾薯块并装袋(箱),剩余的秧蔓、土块等

杂质被输送至收获机末端后跌落至地表[3]。细碎土壤和较短的秧蔓在筛面的自激波动作用下透筛，土块在杆条扰动和筛面波动耦合作用下破碎解聚，较长秧蔓从扰动杆的下方与筛面的间隙或相邻扰动杆间的间隙通过，被输送至筛面末端。若马铃薯为覆膜种植，位于分拣平台前端的捡拾工对覆膜进行清理，避免地膜与扰动杆发生缠绕、挂膜以及影响捡拾顺畅性等情况。

2　扰动分离装置设计与参数确定

2.1　扰动分离装置结构

扰动分离装置是自走式马铃薯收获机的关键部件，主要由摆动臂、横杆、扰动杆、摆动连杆、偏心轮、连接杆和支撑架等组成，如图 2 所示。



(a) 结构示意图　　(b) 实物图

图 2　扰动分离装置

Fig. 2　Disturbance separation device structure

1. 机架　2. 横杆　3. 支撑架　4. 连接杆　5. 扰动杆　6. 偏心轮　7. 摆动连杆　8. 分离筛　9. 摆动臂

扰动分离装置通过支撑架安装在马铃薯收获机机架的两侧立板上，且整体安装高度可通过轴销的安装位置调整，可根据收获工况选择合适的扰动深度，避免扰动深度较浅而导致扰动碎土效果不佳以及扰动深度较深而出现薯块回流现象等；动力装置安装在连接架一侧，可通过调速器调节其转速；偏心轮将动力装置输出的动力通过摆动连杆传递给摆动臂，带动扰动杆往复扰动，扰动杆和扭簧通过销轴安装在横杆下方，扰动杆可绕销轴在薯块输送方向转动。

2.2　扰动分离装置扰动过程分析

扰动杆在驱动装置和偏心轮的作用下进行往复横摆运动，为分析扰动杆对土块破碎作用和薯块受到的碰撞冲击，对扰动分离装置运动进行简化并分析，如图 3 所示，其中 O_1 为偏心轮中心点，O_2 为摆动连杆与偏心轮铰接点，O_3 为摆动臂与连接架铰接点，O_4 为摆动臂与摆动连杆铰接点且与 O_1 安装在同一高度，l_{12} 为偏心距，m；l_{24} 为 O_2O_4 间的距离，即摆动连杆两铰接点间距，m；l_{34} 为 O_3O_4 间的距离，m；l_{bd} 为摆动臂长度，m；l_{hg} 为横杆长度，m；l_{rr} 为相邻两扰动杆间距，m。

当偏心轮稳定运转时，对铰接点 O_2 进行运动分析，得

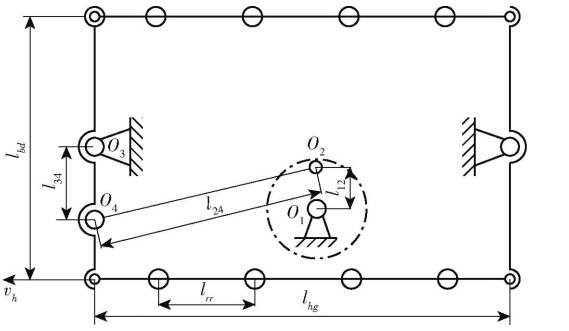


图 3　扰动分离装置运动分析

Fig. 3　Motion analysis of disturbance separation device

$$\begin{cases} v_{o2x} = 2\pi n_p l_{12}\sin\gamma \\ v_{o2y} = 2\pi n_p l_{12}\cos\gamma \end{cases} \tag{1}$$

式中　v_{o2x}——铰接点 O_2 横向运动速度，m/s

v_{o2y}——铰接点 O_2 纵向运动速度，m/s

γ——偏心轮转动角，(°)

n_p——偏心轮转速，r/s

由于偏心轮通过摆动连杆带动摆动臂往复运动，则摆动臂往复摆动周期与偏心轮转速成反比，即

$$T = \frac{1}{n_p} \tag{2}$$

式中　T——摆动臂往复摆动周期，s

通过式(1)、(2)可知，铰接点 O_2 在横向方向运动速度随偏心轮转动角度持续变化，使得摆动臂的摆动速度不断变化。为避免薯块损伤，摆动臂最大摆动速度(扰动杆最大扰动速度)应低于薯块碰撞损伤速度，设装置的摆动臂处于竖直状态时，偏心轮的铰接点 O_2 也处于至高点。通过相对速度原理[25-26]，当铰接点 O_2 横向运动速度达到最大($\gamma = 0°$或 $\gamma = 180°$)时，摆动臂摆动角速度也达到峰值，此时扰动杆横向摆动速度为

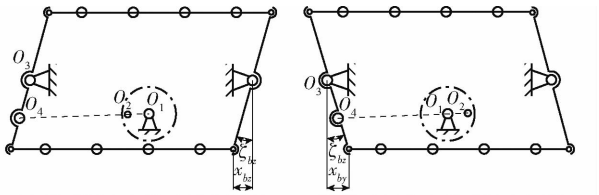
$$v_h = \frac{l_{bd}v_{o4x}}{2l_{34}} = \frac{l_{bd}v_{o2x}}{2l_{34}} = \frac{l_{bd}l_{12}\pi n_p}{l_{34}} \tag{3}$$

式中　v_h——扰动杆横向摆动速度，m/s

v_{o4x}——铰接点 O_4 横向运动速度，m/s

由式(3)可知，扰动杆横向摆动速度与偏心轮的偏心距、转速成正比，随着偏心距的增大和转速的提高，与薯块碰撞时的扰动速度也随之增大。因扰动分离装置需安装在马铃薯收获机两侧立板上，为避免两侧立板与扰动杆发生运动干涉，扰动杆扰动范围应位于两侧立板间，结合式(1)，以下排扰动杆为参照物，当摆动臂摆动速度为 0 时，扰动杆处于最左侧或最右侧，此时扰动杆横向摆动位移最大，对此时扰动分离装置姿态进行分析，如图 4 所示。

对扰动杆最大扰动幅度进行分析得



(a) 扰动杆向左扰动最大幅度 (b) 扰动杆向右扰动最大幅度

图 4 扰动杆摆动姿态简图

Fig. 4 Diagrams of disturbance rod swinging attitude

$$\begin{cases} x_{bz} = \dfrac{l_{bd}}{2}\sin\zeta_{bz} = \\ \quad \dfrac{l_{bd}}{2}\sin\left(\arccos\dfrac{l_{34}^2 + l_{13}^2 - (l_{12}+l_{24})^2}{2l_{34}l_{13}} - \arccos\dfrac{l_{13}}{l_{34}}\right) \\ x_{by} = \dfrac{l_{bd}}{2}\sin\zeta_{by} = \\ \quad \dfrac{l_{bd}}{2}\sin\left(\arccos\dfrac{l_{13}}{l_{34}} - \arccos\dfrac{l_{34}^2 + l_{13}^2 - (l_{24}-l_{12})^2}{2l_{34}l_{13}}\right) \end{cases} \tag{4}$$

式中 x_{bz}——扰动杆向左扰动最大幅度,m

x_{by}——扰动杆向右扰动最大幅度,m

ζ_{bz}——摆动臂向左摆动最大角度,(°)

ζ_{by}——摆动臂向右摆动最大角度,(°)

l_{13}——偏心轮中心点与摆动臂和连接架铰接点的间距,m

为避免扰动杆与收获机两侧立板发生运动干涉,扰动杆的扰动范围应满足

$$x_b = x_{bz} + x_{by} + 3l_{rr} < l_{lb} \tag{5}$$

式中 x_b——扰动杆扰动幅度,m

l_{lb}——机架两侧立板间距,m

根据式(4)、(5)可得扰动杆摆动幅度与摆动臂长度及偏心距成正比,结合马铃薯收获机整体尺寸和分离筛面长度,并保证一定的扰动效果,摆动臂长度设为 620 mm,点 O_3 与 O_4 的间距 l_{34} 设为 140 mm,结合马铃薯收获机两侧立板宽度,横杆长度设为 770 mm,偏心轮中心点与摆动臂和连接架铰接点的间距 l_{13} 设为 420 mm,摆动连杆两铰接点间距 l_{24} 可根据偏心轮偏心距 l_{12} 的变化相应调整。

2.3 分离过程中薯块-扰动杆相互作用关系分析

扰动杆对输送的薯块有一定的回流影响,部分薯块在扰动杆的推力下滚落并接触挡杆,接触挡杆的薯块与扰动杆发生碰撞时,为避免薯块受到挡杆和扰动杆的过度挤压,又保证对土块有一定的破碎效果,在扰动杆与横杆铰接处添加扭簧,对扰动杆施加一定的扭矩,使扰动杆在与薯块碰撞时产生一定的旋转,减少薯块与扰动杆在输送方向上的挤压程度并使薯块和秧蔓顺利通过,该过程如图 5 所示。

输送的薯块与扰动杆碰撞后,扰动杆在扭簧作用下对薯块产生一定推力[27],该过程扰动杆对薯块施加的推力为

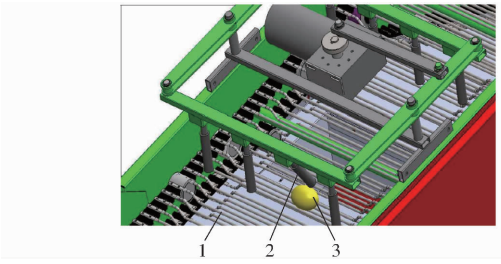


图 5 扰动杆对薯块作用简图

Fig. 5 Schematic of effect of disturbance rod on potatoes

1. 分离筛筛面 2. 扰动杆 3. 马铃薯

$$F_{rs} = \frac{K\delta}{l_{rs}} \tag{6}$$

其中

$$K = \frac{Ed^4}{3\,667D_m N_q} \tag{7}$$

式中 F_{rs}——扰动杆对薯块的推力,N

K——扭转刚度,N·m/(°)

E——扭簧弹性模量,取 2.1×10^5 MPa

d——扭簧线径,取 3.5 mm

D_m——扭簧中径,取 10 mm

N_q——扭簧圈数,取 3.5

δ——扭簧扭转角度,(°)

l_{rs}——扰动杆和薯块接触点与扰动杆铰接点间距,m

为避免薯块翻越挡杆,出现回流现象,对碰撞的薯块进行分析,如图 6 所示。图中 F_{gs} 为杆条对薯块的支持力,N;f_{rs} 为扰动杆与薯块间的摩擦力,N;F_{ds} 为挡杆对薯块的支持力,N;G_s 为马铃薯的重力,N;α_{sd}、β_{gd}、φ_{rd} 为 G_s、F_{gs}、F_{rs} 与薯块质心到挡杆连线的夹角,(°)。

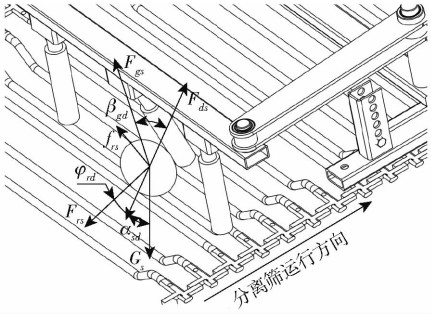


图 6 薯块与扰动杆碰撞时受力分析

Fig. 6 Analysis of force on collision between potato chunks and disturbance rods

对该过程的薯块进行力矩分析得

$$M_s = F_{gs}l_{gs}\sin\beta_{gd} + F_{rs}l_{gs}\sin\varphi_{rd} + f_{rs}l_{fs}\cos\varphi_{rd} - G_s l_{gs}\sin\alpha_{sd} \tag{8}$$

式中 M_s——薯块翻越挡杆受到的力矩,N·m

l_{gs}——薯块质心与挡杆的间距,m

l_{fs}——扰动杆和薯块接触点与薯块和挡杆接触点间距，m

由式(8)可知，扰动杆对薯块推力与薯块受到的力矩成正比，当扰动杆对薯块推力增大时，薯块受到的力矩提高，薯块易翻越挡杆出现回流现象，此外，扰动杆数量、薯块的体型和质量也对薯块回流有一定的影响。结合式(6)、(7)，扰动杆对薯块推力与扭簧系数、扰动杆扭转角度正相关，与扰动杆长度(扰动深度)负相关。扭簧系数已根据实际作业需求进行设定，对薯块通过时的扰动杆扭转角度和扰动深度加以分析，如图 7 所示，其中 T_1、T_2为扰动杆在不同的扰动深度时对薯块施加的扭矩，N·m；δ_1、δ_2为薯块通过时扰动杆的扭转角度，(°)；h_r为扰动的深度差，m；η 为分离筛面倾角，取 30°。

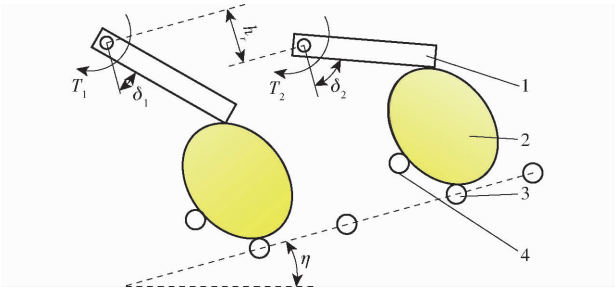


图 7　不同扰动深度对薯块回流影响分析

Fig. 7　Effect of different disturbance depths on reflux of potato chunks

1. 扰动杆　2. 马铃薯　3. 杆条　4. 挡杆

结合图 7，分析不同扰动深度对薯块回流影响可知：扰动深度较浅时，薯块通过时扰动杆扭转角度 δ_1 较小，对薯块施加的推力较小，薯块受到的挤压程度较弱，且土块破碎效果不明显；当扰动深度较深时，扰动杆的扭转角度较大，对薯块施加的推力较大，薯块受到的挤压程度较强，薯块间的相互碰撞现象强烈，易出现薯块损伤和回流现象，但土块破碎效果较好。为避免出现薯块损伤和回流现象的发生，且保持一定的扰动碎土效果，结合马铃薯收获机[3]的作业深度、作业速度和分离筛运行速度，推断出位于扰动分离装置下的薯杂混合物厚度应小于100 mm，则扰动深度设为 20 ~ 90 mm(扰动深度为 90 mm 时，扰动杆底端与分离筛面间距为5 mm)。

当薯块与扰动杆发生侧面碰撞时，由于薯块输送方向与扰动杆横向摆动方向垂直，薯块与扰动杆碰撞时的相对速度为

$$v_{gs} = \sqrt{v_h^2 + v_f^2} \tag{9}$$

式中　v_{gs}——薯块与扰动杆碰撞时相对速度，m/s

v_f——分离筛运行速度，m/s

由式(9)可知，薯块受到的冲击与分离筛的输送速度成正比，经前期研究和查阅文献[3]，分离筛输送速度取 0.7 m/s，马铃薯与 65Mn 钢-橡胶碰撞产生损伤临界速度为 2.344 m/s[28]，为避免扰动杆与薯块碰撞时对薯块造成碰撞损伤，需满足

$$v_{gs} = \sqrt{v_h^2 + v_f^2} = \sqrt{\left(\frac{l_{bd} l_{12} \pi n_p}{l_{34}}\right)^2 + v_f^2} < 2.344 \text{ m/s} \tag{10}$$

结合式(3)，土块或薯块受到的碰撞冲击与偏心轮转速和偏心距成正比。为保证扰动分离装置横杆的下方有足够的空间使薯杂混合物顺利通过，设置扰动杆长度为 200 mm；扰动杆直径影响其与薯块和土块碰撞时的接触面积，直径过小时，与薯块碰撞局部碰撞冲击大，易造成薯块损伤，直径过大，土块破损效果不明显等，设置扰动杆的横截面直径为 20 mm，为减少对薯块的碰撞损伤，扰动杆套有 2 mm 厚的橡胶保护套。

2.4　扰动杆作用下土块破碎过程分析

当土块被输送至扰动分离装置下方时，扰动杆与土块发生碰撞，在惯性力、重力和外界作用下，土块间的作用力大于土块间的粘结力，大土块逐渐破碎掉落。对土块进行受力分析，如图 8a 所示，对土块破裂面进行力矩分析，如图 8b 所示。

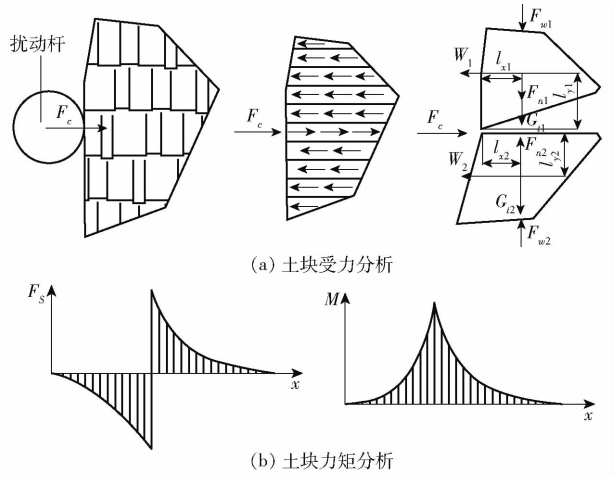


图 8　土块破碎分析

Fig. 8　Analysis of soil fragmentation

扰动杆横摆运动与土块发生碰撞后，设土块断裂面呈矩形，则土块破碎应满足

$$\sigma < \frac{6M}{b_j h_j^2} \tag{11}$$

式中　σ——土块内部正应力，Pa

M——土块所受转矩，N·m

b_j——土块横截面宽度，m

h_j——土块横截面长度，m

由于筛面倾斜一定角度，土块重力在筛面倾斜方向的分力对土块破碎产生一定的影响。假设土块沿扰动杆撞击土块点所在横截面发生破碎[15]，对其

进行分析得

$$\begin{cases} W_1 l_{y1} - F_{w1} l_{x1} - G_{t1} l_{x1} \sin\eta - F_{n1} l_{x1} > 0 \\ W_2 l_{y2} - F_{w2} l_{x2} + G_{t2} l_{x2} \sin\eta - F_{n2} l_{x2} > 0 \\ W_1 = m_1 a_1 \\ W_2 = m_2 a_2 \end{cases} \tag{12}$$

式中 W_1、W_2——上、下方碎土块破碎时的惯性力,N

F_{w1}、F_{w2}——碎土块受到外界作用力,N

F_{n1}、F_{n2}——土块内部粘结力,N

G_{t1}、G_{t2}——碎土块重力,N

m_1、m_2——碎土块质量,kg

l_{y1}、l_{y2}——土块破碎面与碎土块质心间的垂直距离,m

l_{x1}、l_{x2}——碎土块质心与撞击点间的水平距离,m

a_1、a_2——碰撞时碎土块瞬时加速度,m/s

由式(12)可知,土块破碎效果和碎土块惯性力成正比,扰动杆和土块发生碰撞时,土块受到的瞬时冲击和加速度较大,土块在惯性力作用下发生破碎,即土块的破碎效果与碰撞时扰动杆的横向摆动速度成正比,结合式(3)~(5),当偏心距过大时,扰动杆和两侧立板易发生运动干涉,影响装置正常运行,偏心距过小时,扰动杆扰动范围较小,扰动效果不明显,使得土块破碎率较低,则偏心距设为 20~40 mm。根据式(10)、(12)可得偏心轮转速影响土块的碰撞损伤和土块破碎效果,偏心轮转速过高时,扰动杆扰动频率较大,薯块相互碰撞较为剧烈,薯块易发生碰撞损伤;偏心轮转速过低时,扰动杆与土块碰撞时速度较低,土块受到的撞击力较小,土块破碎效果较差,当偏心轮转速低于 3.8 r/s 时,薯块与扰动杆碰撞时相对速度低于薯块碰撞损伤速度,为兼顾薯块间的相互碰撞和薯块回流对薯块碰撞损伤的影响,偏心轮转速设为 1~3 r/s,且转速可通过电流调速器根据实际挖掘的薯土混合比例、土壤类型、薯块品种等进行调节,提高扰动分离装置的收获适应性。在实际工况中,扰动杆数量对整体的土块破碎和薯块回流影响较大,扰动杆的数量过小,扰动效果和土块破碎效果差,扰动杆数量过大,土块破碎效果好,但薯块相互碰撞剧烈,薯块碰撞损伤加剧,根据两侧立板间距和单个扰动杆的扰动范围,每个横杆安装扰动杆 2~6 个,每排扰动杆间距相等,前后扰动杆呈对齐布置,利用扰动杆间距和扭簧的作用,确保薯土混合物顺畅向后输送。相邻扰动杆间距可根据收获工况实际需要的扰动杆数量和扰动幅度相应调整。

3 关键参数耦合仿真优化

为分析在输送过程中马铃薯受到的损伤,同时保证装置具有一定的土块破碎能力,采用 EDEM 2020 与 RecurDyn V9R4 耦合仿真分析确定扰动分离装置的扰动杆数量、扰动深度、偏心轮转速、偏心距等关键参数。在薯土分离阶段,土壤对薯块具有一定的保护作用,可降低薯块的碰撞损伤,因收获过程的薯土比例较为复杂,对马铃薯和土块分别进行仿真分析。

3.1 仿真模型建立

3.1.1 马铃薯颗粒模型和土块模型建立

通过查阅文献[29-30],马铃薯采用多球聚合模型,马铃薯模型如图 9 所示。结合上文分析和前期研究[15]可知,扰动分离装置下的薯杂混合物厚度应小于 100 mm,为获得装置在不同扰动深度的扰动效果,颗粒土块模型设为边长为 90 mm 的正方形,内部通过半径为 5 mm 的颗粒填充,颗粒间添加 bonding 键连接以模拟碎土块间的粘结力,土块模型如图 10 所示。

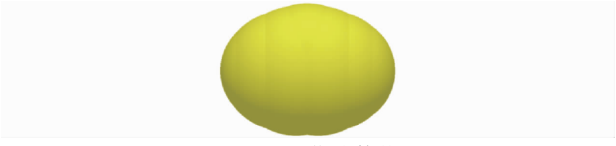


图 9 马铃薯球体模型

Fig. 9 Potato spherical models

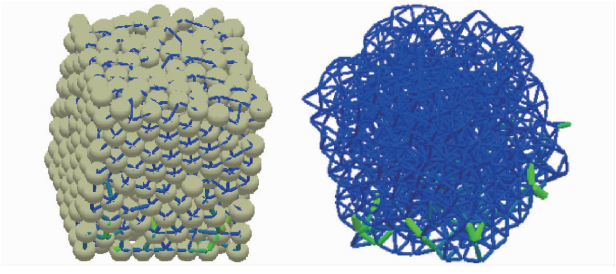


图 10 土块模型和土块内部粘结键

Fig. 10 Clod model and internal bonding bond of clod

3.1.2 几何仿真模型建立

在 Solidworks 建模完成后以 step 格式导入 RecurDyn 软件,将运动形式和连接关系设定完成后通过 wall 文件导入 EDEM Geometries 中,颗粒工厂设置于分离筛前端上方,根据薯垄种植特点,颗粒工厂长设为 800 mm,高设为 200 mm,薯块和土块生成后自由掉落到分离筛面,马铃薯仿真时长设为 12 s,粘结土块生成于分离筛前端的左侧、中间、右侧,土块间共生成 6 587 个粘结键,土块随分离筛面运行而被输送,检测粘结键断裂变化,仿真时长设为 4 s。薯块和土块分别经过扰动分离装置后被输送至分离筛末端,结合马铃薯收获机参数[3],分离筛输送速度设为 0.7 m/s,分离筛升运倾斜角设为 30°,整体耦合模型如图 11 所示,通过查阅文献[30-33],仿真基本参数如表 2 所示。

3.2 仿真试验与结果分析

3.2.1 单因素试验

为探究扰动杆数量对薯块碰撞损伤和土块破碎的

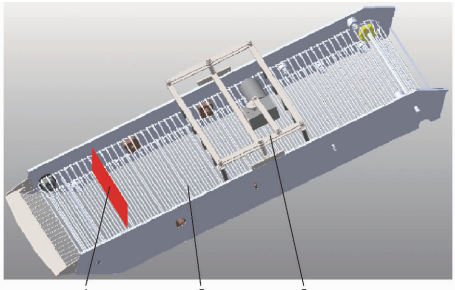


图 11　耦合模型

Fig. 11　Coupled model

1. 颗粒工厂　2. 分离筛　3. 扰动分离装置

影响，结合前文分析，扰动杆数量取 2 ~6、扰动深度设为 55 mm、偏心轮转速设为 2 r/s、偏心距为 30 mm 进行单因素试验，薯块颗粒工厂设置于分离筛前端上方，生成的马铃薯模型不断掉落到筛面，马铃薯仿真时长设为 12 s；粘结土块生成于分离筛前端的左侧、中间、右侧，小颗粒土块间共生成 6 587 个粘结键，土块随分离筛面运行而被输送，检测粘结键断裂变化，仿真时长设为 4 s。分离筛筛面以速度 0.7 m/s 运行，薯块和土块分别经过扰动分离装置后被输送至分离筛末端，通过后处理界面获得扰动过程的马铃薯碰撞力和土块破碎率，土块破碎率计算公式为[34]

$$p = \frac{N_1}{N} \times 100\% \tag{13}$$

式中　p——土块破碎率，%

N_1——土块粘结键断裂数量

N——土块粘结键生成总数量

表 2　模型参数

Tab. 2　Model parameters

参数	数值
薯块密度/(kg·m^{-3})	1 048
薯块泊松比	0.5
薯块剪切模量/MPa	1.366
薯块间静摩擦因数	0.452
薯块间动摩擦因数	0.024
薯块间恢复系数	0.79
薯块与杆条间静摩擦因数	0.445
薯块与杆条间动摩擦因数	0.269
薯块与杆条间恢复系数	0.525
土块间静摩擦因数	0.56
土块间动摩擦因数	0.27
土块间恢复系数	0.13
土块与杆条间静摩擦因数	0.6
土块与杆条间动摩擦因数	0.35
土块与杆条间恢复系数	0.16
土块密度/(kg·m^{-3})	1 210
土块泊松比	0.25
土块剪切模量/MPa	1
土块颗粒间法向刚度/(N·m^{-1})	2.4×10^5
土块颗粒间法向最大应力/MPa	0.235
土块颗粒间切向刚度/(N·m^{-1})	1.7×10^5
土块颗粒间切向最大应力/MPa	0.186
杆条泊松比	0.28
杆条剪切模量/MPa	3.1×10^5
杆条密度/(kg·m^{-3})	7 800

薯块仿真过程如图 12 所示，扰动杆数量为 2

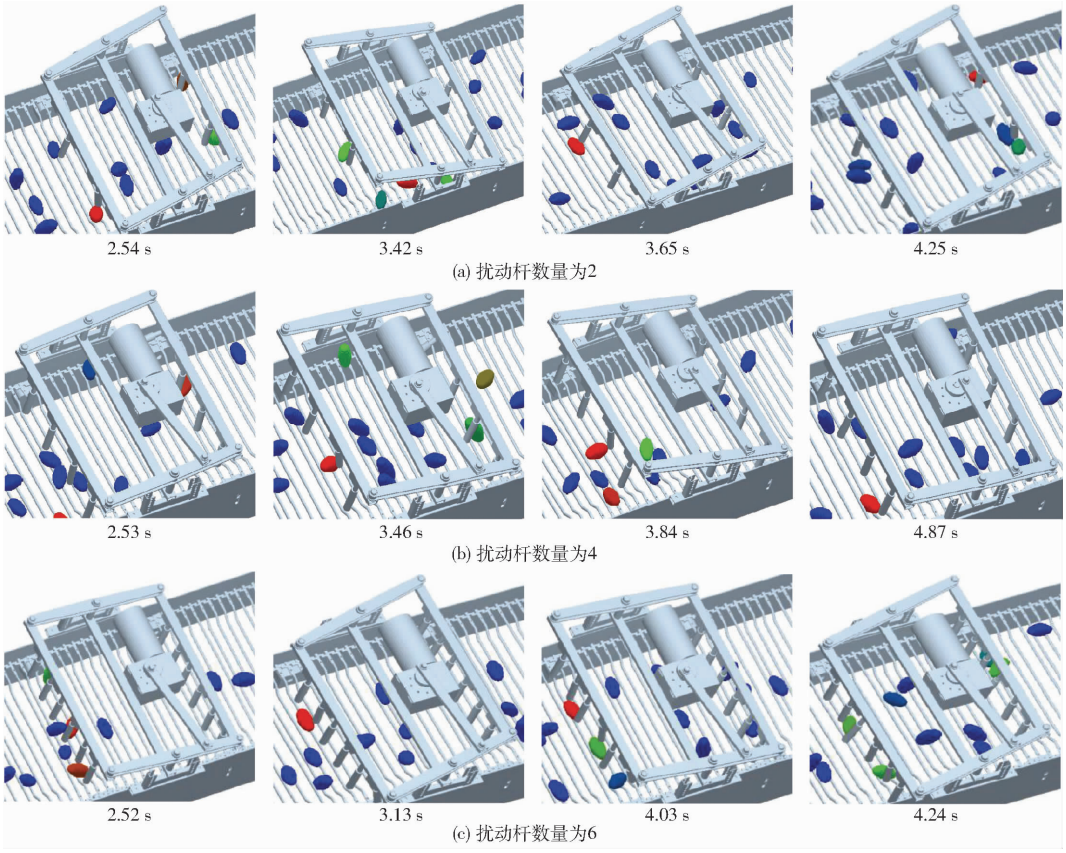


图 12　不同扰动杆数量时薯块碰撞回流仿真结果

Fig. 12　Simulation results of potato block collision reflux under different disturbance rod quantities

时,扰动杆间距较大,薯块与扰动杆碰撞几率低,大部分薯块被分离筛直接输送到分离筛末端,少量薯块在扰动杆的扰动作用下横向移动,薯块间相互碰撞情况较为平缓,薯块受到的最大碰撞力为 125 N;随着扰动杆数量的增加,扰动杆对薯块的碰撞频率增加,薯块间的碰撞频率也相应增大,当扰动杆数量增加至 4 时,薯块受到的最大碰撞力为 123 N,薯块可顺利通过,未出现回流现象;当扰动杆数量增加至 6 时,薯块与扰动杆的碰撞频率继续提高,薯块间的碰撞加剧,且出现单个薯块同时碰撞两个扰动杆,薯块所受碰撞力增大,在薯-薯碰撞下,薯块出现回流现象,薯块受到的最大碰撞力提高到 156 N,为避免薯块因回流和碰撞造成损伤,扰动杆数量不应超过 4,当扰动杆数量为 2 时,土块在扰动作用下逐渐破碎,由于扰动杆间距较大,扰动范围较小,土块破碎率较低,为 31.7%,当扰动杆数量增加至 4 时,土块破碎过程如图 13 所示,扰动杆的扰动范围增大,土块与前排扰动杆碰撞时,土块颗粒间粘结键断裂数量较多,大部分土块破碎掉落,土块与后排扰动杆碰撞时,破碎效果低于前排扰动,因为在前排扰动杆扰动后,大土块被碰撞成小土块支撑在杆条上,部分小土块低于扰动范围,此时破碎率提高到 60.1%,为兼顾薯块碰撞损伤和土块破碎,每组扰动杆的数量取 4,结合收获机两侧立板宽度和扰动幅度,扰动杆间距设为 180 mm。

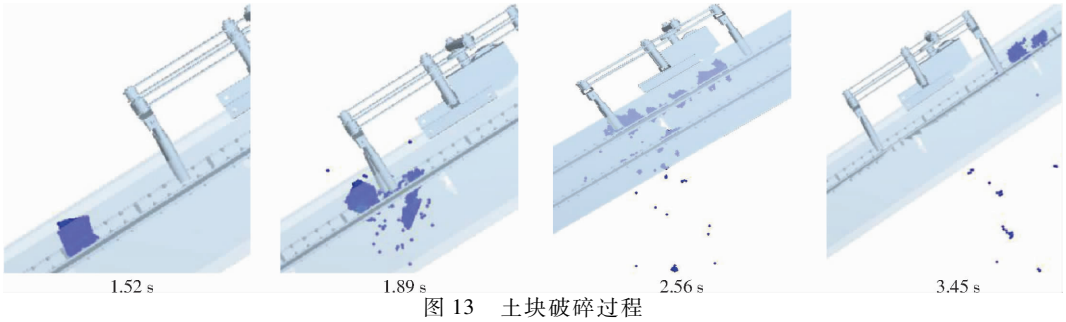


图 13 土块破碎过程

Fig. 13 Crushing process of clods

扰动杆数量为 4 时,马铃薯最大碰撞力与仿真时间关系如图 14a 所示,土块粘结键数量与仿真时间关系如图 14b 所示,扰动杆数量对马铃薯最大碰撞力和土块破碎率影响如图 15 所示。

3.2.2 三因素三水平试验

结合前文分析,扰动深度设为 20 ~ 90 mm,偏心轮转速设为 1 ~ 3 r/s,偏心距设为 20 ~ 40 mm,运用 Box - Behnken 中心组合设计方法,将上述变量作为试验指标,马铃薯最大碰撞力 Y_1 和土块破碎率 Y_2 作为评价指标,设计三因素三水平试验[35],试验因素编码如表 3 所示。

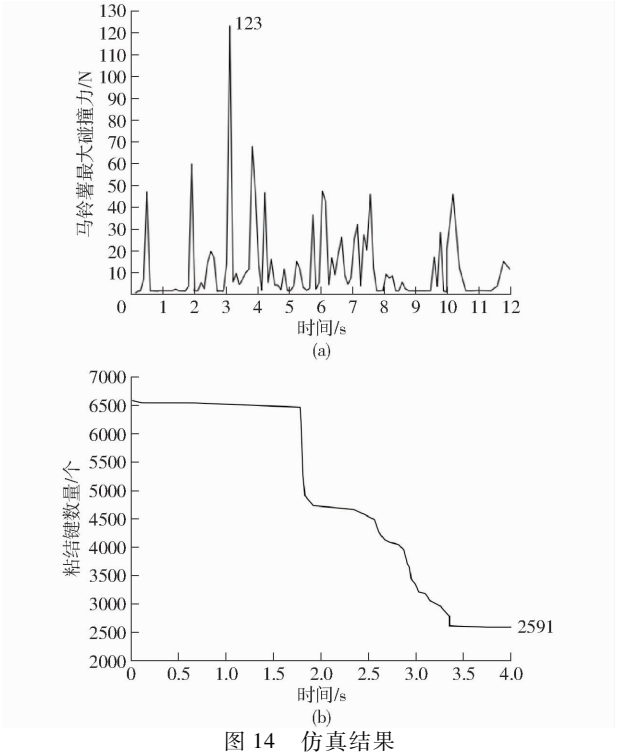


图 14 仿真结果

Fig. 14 Simulation results

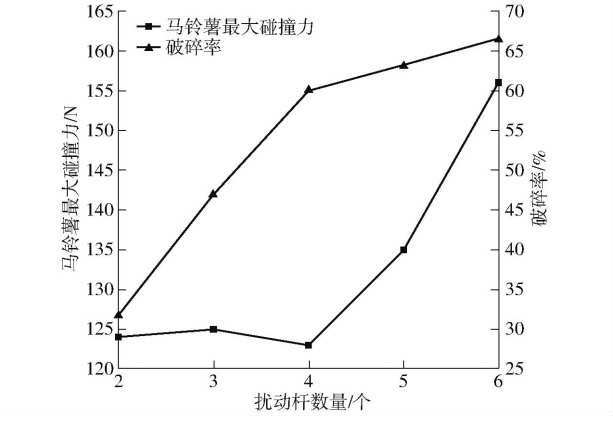


图 15 扰动杆数量对评价指标的影响

Fig. 15 Impact of number of disturbance rods on evaluation indicators

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Encoding of experimental factors

编码	因素		
	扰动深度/mm	偏心轮转速/(r·s^{-1})	偏心距/mm
-1	20	1	20
0	55	2	30
1	90	3	40

3.2.3　试验结果与方差分析

试验方案及结果如表 4 所示，其中 A、B、C 分别表示扰动深度、偏心轮转速、偏心距编码值，建立回归模型拟合正交试验数据。最大碰撞力和破碎率方差分析如表 5、6 所示，并进行显著性检验。

表 4　响应面试验方案与结果

Tab. 4　Response surface test protocol and results

试验编号	因素			马铃薯最大碰撞力 Y_1/N	土块破碎率 Y_2/%
	A	B	C		
1	−1	−1	0	95.23	47.62
2	1	−1	0	125.20	55.10
3	−1	1	0	100.19	50.18
4	1	1	0	142.96	68.98
5	−1	0	−1	102.36	51.18
6	1	0	−1	125.20	61.11
7	−1	0	1	105.14	52.57
8	1	0	1	145.96	70.48
9	0	−1	−1	110.85	49.83
10	0	1	−1	124.48	64.33
11	0	−1	1	128.25	64.13
12	0	1	1	140.35	71.33
13	0	0	0	112.85	63.43
14	0	0	0	109.96	60.48
15	0	0	0	118.31	61.16
16	0	0	0	111.77	61.89
17	0	0	0	115.51	60.26

表 5　最大碰撞力方差分析

Tab. 5　Analysis of variance of maximum collision force

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3 517.52	9	390.84	41.31	<0.000 1
A	2 325.62	1	2 325.62	245.79	<0.000 1
B	293.43	1	293.43	31.01	0.000 8
C	403.42	1	403.42	42.64	0.000 3
AB	40.96	1	40.96	4.33	0.076 0
AC	80.82	1	80.82	8.54	0.022 3
BC	0.59	1	0.59	0.062	0.810 7
A^2	17.72	1	17.72	1.87	0.213 5
B^2	76.64	1	76.64	8.10	0.024 8
C^2	271.92	1	271.92	28.74	0.001 1
残差	66.23	7	9.46		
失拟项	23.27	3	7.76	0.72	0.589 1
误差	42.96	4	10.74		
总和	3 583.75	16			

由表 5、6 可知，回归模型 P 值均小于 0.01，表明各评价指标拟合模型极显著；失拟项 P 值均大于 0.05，不显著，表明方程模拟效果较好，试验因素对马铃薯最大碰撞力影响从大到小依次为扰动深度、偏心距、偏心轮转速，对碎土率影响从大到小依次为扰动深度、偏心轮转速、偏心距。模型的决定系数 R^2 分别为 0.981 5、0.972 5，接近于 1，表明模型拟合性可靠，通过软件得到马铃薯最大碰撞力多元二次回归方程为

$$Y_1 = 113.68 + 17.05A + 6.06B + 7.1C + 3.2AB + 4.5AC - 0.38BC - 2.05A^2 + 4.27B^2 + 8.04C^2 \tag{14}$$

土块破碎率多元二次回归方程为

$$Y_2 = 61.44 + 6.77A + 4.77B + 4.01C + 2.83AB + 2AC - 1.82BC - 4.77A^2 - 1.2B^2 + 2.16C^2 \tag{15}$$

表 6　破碎率方差分析

Tab. 6　Analysis of variance for crushing rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	856.71	9	95.19	27.53	0.000 1
A	366.12	1	366.12	105.89	<0.000 1
B	181.83	1	181.83	52.59	0.000 2
C	128.48	1	128.48	37.16	0.000 5
AB	32.04	1	32.04	9.26	0.018 7
AC	15.92	1	15.92	4.60	0.069 0
BC	13.32	1	13.32	3.85	0.090 4
A^2	95.88	1	95.88	27.73	0.001 2
B^2	6.08	1	6.08	1.76	0.226 3
C^2	19.70	1	19.70	5.70	0.048 4
残差	24.20	7	3.46		
失拟项	17.65	3	5.88	3.59	0.124 4
误差	6.55	4	1.64		
总和	880.92	16			

3.2.4　响应面

通过仿真过程和结果分析可知，对于马铃薯最大碰撞力，当扰动深度增大时，薯块通过时扰动杆的扭转角度也随之增大，导致对薯块的挤压力提高，薯块碰撞力增大；当偏心轮转速提高时，扰动杆与薯块发生碰撞时的速度提高，薯块所受碰撞冲击增大，即最大碰撞力随着扰动深度和偏心轮转速的增大呈上升趋势，当偏心轮转速为 1.4 r/s 时，响应曲面如图 16a 所示。对于破碎率，当扰动深度较浅时，部分土块低于扰动杆的扰动范围，未与扰动杆发生碰撞破碎，降低装置的破碎率，随着扰动深度和扰动速度的增大，扰动杆对薯块的冲击力和扰动范围增大，破碎率呈上升趋势，当偏心距为 24 mm 时，响应曲面如图 16b 所示。

3.2.5　参数优化

利用 Design-Expert 10 软件中参数优化模块进行优化，构建目标函数以及约束条件

$$\begin{cases} \min Y_1(A,B,C) \\ \max Y_2(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{16}$$

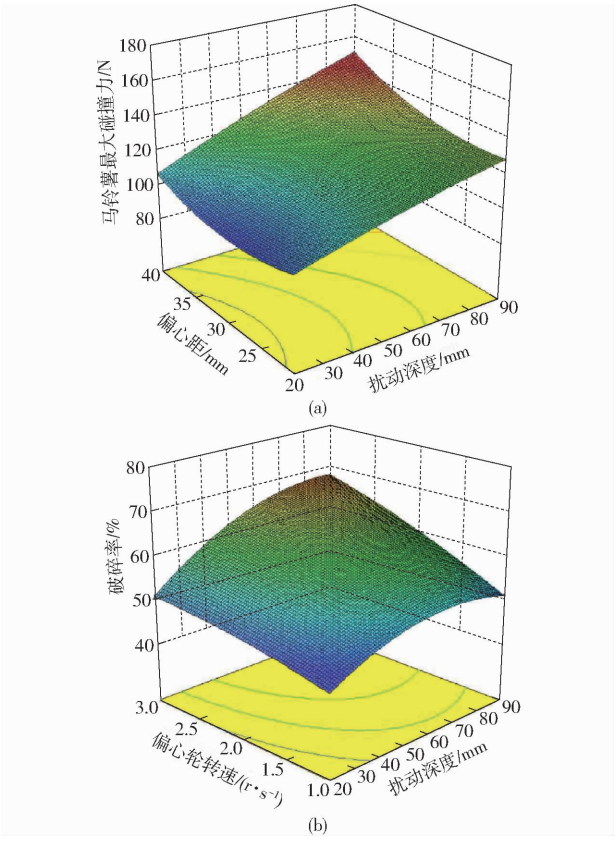


图 16 因素交互作用对评价指标影响的响应面

Fig. 16 Impact of interactive factors on evaluation indicators

优化后最优参数组合为:扰动深度 51.515 mm,偏心轮转速 2.263 r/s,偏心距 30.976 mm,此时最大碰撞力为 114.485 N,破碎率为 62.167%。

4 验证试验

为验证装置性能,在山东思代尔农业装备有限公司进行试验,土壤平均含水率 8.87%,在试验过程中,分离筛运行速度设为 0.7 m/s,扰动深度为 51.5 mm,通过调速器设偏心轮转速为 2.3 r/s,偏心距为 31 mm,将土块、薯块和电子马铃薯放置于分离筛筛面,观察和记录土块破碎和薯块碰撞过程,将放入土块质量和扰动后留在筛面土块质量作对比,利用电子马铃薯获取马铃薯碰撞信息,共测试 5 组试验,每组试验分别测试 3 次并取均值,验证试验如图 17 所示。其中破碎率计算式为

$$p = \frac{m_t - m_{t1}}{m_t} \times 100\% \tag{17}$$

式中 m_t——土块总质量,kg

m_{t1}——扰动后筛面剩余的土块质量,kg

通过试验观察可得:薯块与扰动杆发生非正面碰撞时,在扰动杆和分离筛的作用下,薯块出现横向移动现象,薯块间易发生碰撞;薯块与扰动杆发生正面碰撞时,薯块能顺利通过,未出现回流现象;大部分土块受到扰动杆冲击后破碎掉落,由于扰动杆横向摆动速度处于实时变化状态,少量土块与扰动杆发生碰撞时,受到的冲击速度较小,未发生破碎,测试结果如表 7 所示。



图 17 验证试验

Fig. 17 Verification test

表 7 测试结果

Tab. 7 Assessment index test result

土块总质量/kg	扰动后未破碎土块质量/kg	破碎率/%	平均破碎率/%	马铃薯碰撞加速度峰值/($m \cdot s^{-2}$)	平均碰撞加速度峰值/($m \cdot s^{-2}$)
5.62	2.12	62.35		740.88	
5.15	2.03	60.55		789.49	
5.58	2.34	58.14	60.7	835.25	790.66
4.61	1.86	59.74		807.03	
4.76	1.77	62.72		780.57	

由试验结果可知,该装置对土块有明显的破碎效果,由于各土块粘度、马铃薯收获机发动机运行产生的振动和分离筛运行的平顺性均会影响土块破碎,仿真结果与试验结果相差 1.467 个百分点,利用电子马铃薯碰撞检测技术获得马铃薯碰撞加速度峰值均小于马铃薯临界损伤阈值[28,36],该装置可配合振动轮等装置提高碎土率。

5 结论

(1)针对小型马铃薯收获机土块破碎不佳而影响收获品质,设计了一款马铃薯收获机扰动分离装置,由摆动臂、横杆、扰动杆、摆动连杆、偏心轮、连接杆和支撑架等组成,通过对马铃薯和土块的碰撞特性和破碎原理分析,得到了影响马铃薯碰撞损伤和土块破碎的主要因素为扰动杆扰动深度、偏心轮转速和偏心距。

(2)基于离散元和多体动力学耦合构建仿真模型,通过单因素试验确定扰动杆数量为 4,并运用 Box - Behnken 中心组合设计方法得到最优参数组合。验证试验结果表明:当扰动分离装置扰动深度为 51.5 mm、通过调速器设偏心轮转速为 2.3 r/s、偏心距为 31 mm 时,土块破碎率为 60.7%,电子马铃薯采集的碰撞加速度峰值平均值为 790.66 m/s^2,小于马铃薯临界损伤阈值。

参 考 文 献

[1] KHAMALETDINOV R, MARTYNOV V, MUDARISOV S, et al. Substantiation of rational parameters of the root crops separator with a rotating inner separation surface[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2019, 51(1): 15 – 20.

[2] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报,2019,50(3): 1 – 16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 1 – 16. (in Chinese)

[3] 魏忠彩,王兴欢,李学强,等. 履带自走式分拣型马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):95 – 106.
WEI Zhongcai, WANG Xinghuan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 95 – 106. (in Chinese)

[4] 杨然兵,田光博,尚书旗,等. 马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):107 – 118.
YANG Ranbing, TIAN Guangbo, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 107 – 118. (in Chinese)

[5] 谢胜仕,王春光,邓伟刚,等. 摆动分离筛薯土分离机理分析与参数优化试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11):156 – 164.
XIE Shengshi, WANG Chunguang, DENG Weigang, et al. Separating mechanism analysis and parameter optimization experiment of swing separation sieve for potato and soil mixture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 156 – 164. (in Chinese)

[6] 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 Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, 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. (in Chinese)

[7] 刘嘉程,魏梦阳,康宏彬,等. 基于滚筒式分离的马铃薯收获机设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(5):96 – 103.
LIU Jiacheng, WEI Mengyang, KANG Hongbin, et al. Design and experiment of drum type potato harvester separation device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 96 – 103. (in Chinese)

[8] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等. 马铃薯联合收获机立式环形分离输送装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(3): 10 – 18.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of vertical circular separating and conveying device for potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 10 – 18. (in Chinese)

[9] 魏忠彩,李洪文,孙传祝,等. 基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1): 129 – 140,112.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuanzhu, et al. Design and experiment of potato combined harvester based on multi-stage separation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 129 – 140,112. (in Chinese)

[10] 王相友,吕丹阳,任加意,等. 装袋型马铃薯联合收获机清选装置研制[J]. 农业工程学报,2022,38(增刊 1):8 – 17.
WANG Xiangyou, LÜ Danyang, REN Jiayi, et al. Development of a cleaning device for a bagged potato combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(Supp. 1): 8 – 17. (in Chinese)

[11] 王相友,孙景彬,许英超,等. 拨辊推送式马铃薯清选分选机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(10):316 – 322,279.
WANG Xiangyou, SUN Jingbin, XU Yingchao, et al. Design and experiment of potato cleaning and sorting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 316 – 322,279. (in Chinese)

[12] 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 4U2A 型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):17 – 24.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 17 – 24. (in Chinese)

[13] 刘兴,杨珍,薛建,等. 马铃薯联合收获机械研究进展[J]. 农机化研究,2022,44(5):259 – 263,268.
LIU Xing, YANG Zhen, XUE Jian, et al. Progress of potato research combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(5): 259 – 263, 268. (in Chinese)

[14] 魏宏安, 张俊莲, 杨小平, 等. 4UFD – 1400 型马铃薯联合收获机改进设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 12 – 17.
WEI Hongan, ZHANG Junlian, YANG Xiaoping, et al. Improved design and test of 4UFD – 1400 type potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 12 – 17. (in Chinese)

[15] 魏忠彩,王业炜,李学强,等. 弹性揉搓式马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(14):60 – 69.
WEI Zhongcai, WANG Yewei, LI Xueqiang, et al. Design and experiments of the potato combine harvester with elastic rubbing technology[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 60 – 69. (in Chinese)

[16] 张兆国, 王海翼, 李彦彬, 等. 多级分离缓冲马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2):96 – 109.
ZHANG Zhaoguo, WANG Haiyi, LI Yanbin, et al. Design and experiment of multi-stage separation buffer potato harvester

[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 96 – 109. (in Chinese)

[17] 魏忠彩,李洪文,苏国梁,等. 低位铺放双重缓冲马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(9):140 – 152.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Design and experiment of potato harvester using double cushions for low laying separation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 140 – 152. (in Chinese)

[18] ROGER C B. Impact testing of potato harvesting equipment[J]. American Potato Journal, 2008, 70(3): 243 – 256.

[19] KHEIRALIPOUR K, KHAZAEE Y, HOSAINPOUR A, et al. Development of an algorithm based on image processing technique and sport vector machine to distinct potato from clod and stone[J]. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery, 2019, 8(1): 1 – 11.

[20] BULGAKOV V, PASCUZZI S, NIKOLAENKO S, et al. Theoretical study on sieving of potato heap elements in spiral separator [J]. Agronomy Research, 2019, 17(1): 33 – 48.

[21] HRUSHETSKY S M, YAROPUD V M, DUGANETS V I, et al. Research of constructive and regulatory parameters of the assembly working parts for potato harvesting machines[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2019, 58(3): 21 – 28.

[22] CELIK H K, CINAR R, YILMAZ D, et al. Mechanical collision simulation of potato tubers[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(5): 1 – 7.

[23] 李聿尧,杨红光,王冰,等. 马铃薯联合收获薯土分离技术与装置研究[J]. 中国农机化学报,2022,43(10):42 – 50.
LI Yuyao, YANG Hongguang, WANG Bing, et al. Study on technology and device of potato and soil separation in potato combined harvest[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(10): 42 – 50. (in Chinese)

[24] 王海翼. 山地自走式马铃薯联合收获机设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
WANG Haiyi. Mountain self propelled potato combine harvester design and experiment[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[25] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学 I[M]. 北京:高等教育出版社,2016.

[26] 东南大学机械学学科组. 机械原理(第七版)[M]. 北京:高等教育出版社,2016.

[27] 魏忠彩,韩梦,苏国梁,等. 装包卸包型马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):92 – 104.
WEI Zhongcai, HAN Meng, SU Guoliang, et al. Design and experiment of a bagging and unloading potato combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 92 – 104. (in Chinese)

[28] 谢胜仕,王春光,邓伟刚. 马铃薯碰撞损伤试验与碰撞加速度特性分析[J]. 中国农业大学学报,2020,25(1):163 – 169.
XIE Shengshi, WANG Chunguang, DENG Weigang. Collision damage test and acceleration characteristic analysis of potato [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(1): 163 – 169. (in Chinese)

[29] LI Y Y, HU Z C, GU F W, et al. DEM – MBD coupling simulation and analysis of the working process of soil and tuber separation of a potato combine harvester[J]. Agronomy, 2022, 12(8): 17 – 34.

[30] 魏忠彩,苏国梁,李学强,等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):109 – 122.
WEI Zhongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109 – 122. (in Chinese)

[31] 李学强,王兴欢,刘洋,等. 马铃薯联合收获机环形减损集薯升运装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(12):109 – 120.
LI Xueqiang, WANG Xinghuan, LIU Yang, et al. Design and experiment of circular reducing and collecting potato lifting device for potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 109 – 120. (in Chinese)

[32] 纪龙龙. 马铃薯干式刷脱清土装置试验与优化[D]. 北京:中国农业科学院,2021.
JI Longlong. Experiment and optimization of potato dry-type brush roller cleaning device[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)

[33] 王立军,彭博,宋慧强. 玉米收获机聚氨酯橡胶筛筛分性能仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(7):90 – 96.
WANG Lijun, PENG Bo, SONG Huiqiang. Cleaning of maize mixture based on polyurethane rubber sieve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 90 – 96. (in Chinese)

[34] 吕金庆,刘金妮,赵治明,等. 马铃薯碎土整地联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):19 – 29.
LÜ Jinqing, LIU Jinni, ZHAO Zhiming, et al. Design and test of key components of potato soil-crushing site preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 19 – 29. (in Chinese)

[35] 吕金庆,杜长霖,刘中原,等. 马铃薯料斗机除杂装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(1):82 – 90,61.
LÜ Jinqing, DU Changlin, LIU Zhongyuan, et al. Design and test of impurity removal device of potato receiving hopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 82 – 90, 61. (in Chinese)

[36] 蒙建国,王春光,谢胜仕,等. 马铃薯恢复系数测定试验分析[J]. 中国农业大学学报,2017,22(9):93 – 100.
MENG Jianguo, WANG Chunguang, XIE Shengshi, et al. Measurements test analysis of potato restitution coefficient[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 93 – 100. (in Chinese)