

自走式马铃薯捡拾机捡拾装置参数优化与试验

汪 昕^{1,2} 杨德秋^{1,2} 刘萌萌^{1,2} 李 洋^{1,2} 陈新予^{1,2} 程子文^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要:为解决马铃薯分段收获后,人工捡拾劳动强度大、效率低、成本高等问题,设计了一种自走式马铃薯捡拾机捡拾装置。针对捡拾装置喂入部分易壅土,造成马铃薯输送不畅通,影响整机作业效率的问题,设计了一种具有双层反转链条夹持输送功能的捡拾装置。为确定捡拾装置最佳的作业参数,基于离散元软件 EDEM 和多体动力学软件 RecurDyn 耦合仿真,运用 Box - Benhnken 试验方法,以马铃薯流量和伤薯率为试验指标,以捡拾装置前进速度、捡拾铲入土深度、捡拾装置输送链线速度和反转夹持链线速度为试验因素,对该装置工作参数进行四因素三水平试验,使用 Design-Expert 软件建立二次多项式回归模型。对回归模型进行优化后,绘制出响应面曲线图,得出该装置最佳工作参数。田间试验表明,当捡拾装置前进速度为 0.70 m/s、捡拾铲入土深度为 120 mm、捡拾装置输送链线速度为 1.20 m/s、反转链线速度为 1.20 m/s 时,马铃薯流量为 5.94 kg/s,伤薯率为 2.10%,与仿真理论值相比,误差分别为 3.30% 和 4.48%。该研究可为马铃薯捡拾装置设计提供参考。

关键词: 马铃薯捡拾机; 捡拾装置; EDEM - RecurDyn 联合仿真; 参数优化

中图分类号: S225.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0020-10

Parameter Optimization and Experiment of Picking Device of Self-propelled Potato Collecting Machine

WANG Xin^{1,2} YANG Deqiu^{1,2} LIU Mengmeng^{1,2} LI Yang^{1,2} CHEN Xinyu^{1,2} CHENG Ziwen^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problems of high labor intensity, low efficiency, and high cost of manual picking after segmented harvesting of potatoes, a self-propelled potato picking device was designed. The picking device with a double layer reverse chain clamping and conveying function was designed to address the issue of soil accumulation in the feeding part of the picking device, which caused poor potato conveying and affected the overall operation efficiency. To determine the optimal operating parameters of the picking device, a Box - Benhnken test method was used based on the coupling simulation of discrete element software EDEM and multi body dynamics software RecurDyn. The potato flow rate and potato damage rate were used as experimental indicators, and the forward speed of the picking device, the depth of the picking shovel into the soil, the conveying chain speed of the picking device, and the reverse clamping chain speed were used as experimental factors. A four-factor and three level experimental was conducted on the working parameters of the device, Design-Expert software was used to establish a quadratic polynomial regression model. After optimizing the regression model, a response surface curve was drawn to determine the optimal operating parameters of the device. Field experiments showed that when the forward speed of the picking device was 0.70 m/s, the depth of the picking shovel into the soil was 120 mm, the conveying chain speed of the picking device was 1.20 m/s, and the reverse chain speed was 1.20 m/s, the potato flow rate was 5.94 kg/s, and the potato damage rate was 2.10%. Compared with the simulated theoretical values, the errors were 3.30% and 4.48%, respectively. The research result can provide reference for the design of potato picking devices.

Key words: potato collecting machine; picking device; EDEM - RecurDyn joint simulation; parameter optimization

收稿日期: 2023 - 06 - 25 修回日期: 2023 - 08 - 29
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS - 09 - P25)
作者简介: 汪昕(2001—),男,硕士生,主要从事马铃薯收获机械研究,E-mail: 2696524623@qq.com
通信作者: 杨德秋(1974—),男,研究员,主要从事马铃薯生产全程机械化研究,E-mail: yangdq@maen.com.cn

0 引言

马铃薯是我国第四大粮食作物,种植面积和产量均居世界第一。欧美国家马铃薯生产绝大多数采用联合收获方式,且机械化率已接近 100%;国内大部分采用马铃薯分段收获。因马铃薯联合收获与分段收获相比,成本高、伤薯率高,近些年很难在我国推广应用。而在我国较为普遍的分段收获中,即使在我国马铃薯农机农艺结合度最高、机械化基础最好的北方一季作区,马铃薯捡拾这一环节,绝大多数靠人工进行捡拾,劳动强度大,费时费力。因此,迫切需要解决马铃薯生产捡拾收获关键环节机械化问题。

马铃薯机械捡拾属于二次收获,为尽量避免给农户造成二次收获损失,伤薯率是马铃薯捡拾装置设计的关键性指标^[1-5]。虽然,马铃薯挖掘机、联合收获机与马铃薯捡拾机对伤薯率的研究具有一定共性,但因马铃薯捡拾装置的工作对象是经马铃薯挖掘机挖掘后平铺于地表的马铃薯,与现有的马铃薯挖掘机与联合收获机相比,在马铃薯分布情况、土壤参数、马铃薯运动特性上有较大区别。在研究过程中,不仅需保证伤薯率符合行业标准,同时应尽量提高捡拾装置和整机的作业效率,而马铃薯在捡拾装置上的质量流量反映捡拾装置的作业效率,也是影响整机工作效率的瓶颈因素。

针对上述问题,本文基于北方一季作区的马铃薯种植农艺和作业环境,依据薯土混合物在捡拾过程中的运动特征与实际作业情况,设计一种应用于自走式马铃薯捡拾机的捡拾装置,使用离散元软件 EDEM 与多体动力学软件 RecurDyn 耦合仿真的试验方法,确定马铃薯捡拾装置的最佳工作参数,并通过田间试验验证仿真优化结果,以为马铃薯捡拾装置的设计与参数确定提供参考。

1 捡拾装置总体结构与工作原理

1.1 捡拾装置总体结构

自走式马铃薯捡拾机主要由捡拾装置、驾驶室、升运链装置、三级输送链装置、站台、分拣台以及卸料装置等组成,结构如图 1 所示。

捡拾装置需将经马铃薯挖掘机挖掘后,平铺于地表的马铃薯及土壤和残余秧蔓喂入机器,并完成薯土分离、摘秧后,送入后级升运链中,捡拾装置总体结构如图 2 所示,该装置主要由切土圆盘、橡胶挡板、捡拾铲、有缘托轮、支撑托轮、反转链条、链轮、输送链、抖动轮、集薯板、梅花轮、摘秧辊等组成。捡拾装置结构参数如表 1 所示。

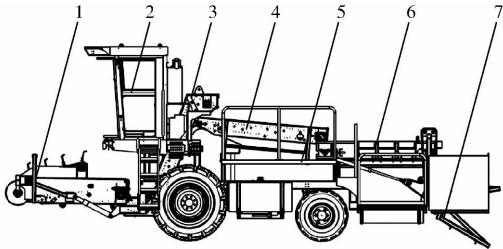


图 1 自走式马铃薯捡拾机整体结构
Fig.1 Overall structure of self-propelled potato collecting machine

1. 捡拾装置 2. 驾驶室 3. 升运链装置 4. 三级输送链装置
5. 站台 6. 分拣台 7. 卸料装置

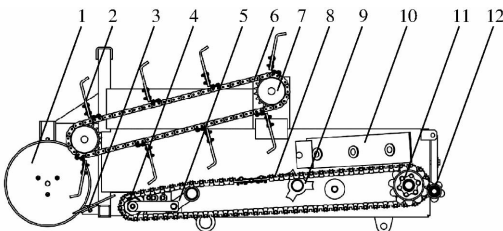


图 2 捡拾装置结构示意图
Fig.2 Picking device structure diagram

1. 切土圆盘 2. 橡胶挡板 3. 捡拾铲 4. 有缘托轮 5. 支撑托轮
6. 反转链条 7. 链轮 8. 输送链 9. 抖动轮 10. 集薯板
11. 梅花轮 12. 摘秧辊

表 1 捡拾装置结构参数
Tab.1 Structural parameters of picking device

参数	数值
总体尺寸/(mm×mm×mm)	2 000×1 700×900
总体质量/kg	850
整机配套动力/kW	110
作业幅宽/mm	1 600
拾净率/%	≥96
伤薯率/%	≤5

1.2 捡拾装置工作原理

当自走式马铃薯捡拾机作业时,柴油发动机作为动力源,推动捡拾装置前进。与此同时,动力经由液压系统传递至捡拾装置驱动马达中,驱动输送链运转,完成输送工作。

捡拾作业开始时,经马铃薯挖掘机挖掘后平铺于地表上的马铃薯与较为松散的土壤及残余秧蔓由捡拾铲铲起后,在输送链带动下,向后方运动。期间,在抖动轮振动的作用下,土壤被抖落;在摘秧辊的作用下,秧蔓也被分离出输送链。最后,理想状态下,在捡拾装置末端与下一级装置的交接处,只剩清洁的薯块向后方输送。

2 关键结构设计

与马铃薯挖掘机、马铃薯联合收获机不同,马铃薯捡拾机的作业对象是经马铃薯挖掘机振动分

离后的薯土混合物。根据马铃薯机械化收获的情况,马铃薯经过挖掘、薯土分离后,较均匀地平铺在挖掘后高度大体一致的薯垄上^[6]。与马铃薯挖掘机、联合收获机相比,马铃薯捡拾机捡拾铲所需的入土深度较小,整机前进阻力较小,且由于经过前期马铃薯挖掘机的薯土分离,所收起的马铃薯薯块上黏土较少,土粒、土块与薯块之间间隙增大、黏合性降低。两种机具前端入土铲的工作实况如图 3 所示。

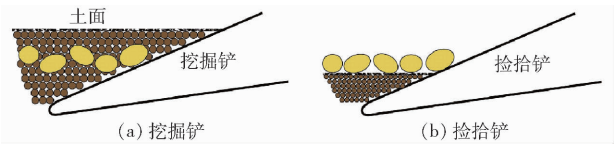


图 3 挖掘铲与捡拾铲工作对比

Fig. 3 Comparison diagrams of digging and picking shovel work

因捡拾铲在工作时所受前进阻力较小,且马铃薯捡拾机捡拾收获属于二次收获,二次漏薯对用户造成的经济损失较大,因此选用普通平铲作为捡拾铲既能满足使用条件又能降低捡拾收获的漏薯率。为保证捡拾装置捡拾起马铃薯,对应于薯垄位置作业的捡拾铲的有效工作宽度 W_1 应略大于垄底宽度,计算式为^[7-9]

$$W_1 = L + s + 3\sigma + \varepsilon \tag{1}$$

式中 L ——马铃薯种植行距,mm
 s ——马铃薯生长平均分布宽度,mm
 σ ——综合标准差,mm
 ε ——机具行驶偏差,mm

研究表明,确保薯土混合物沿着捡拾铲上表面向后运动的条件是^[9]

$$P \geq G_c \tan(\alpha + \varphi) \tag{2}$$

式中 P ——捡拾铲铲面掘起土壤的作用力,N
 G_c ——捡拾铲铲面上薯土混合物重力,N
 α ——捡拾铲入土角,(°)
 φ ——土壤对铲面的摩擦角,(°)

参考马铃薯挖掘收获的理论经验,马铃薯垄作收获的挖掘铲入土角一般设置为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。结合马铃薯种植农艺,综合考虑捡拾铲的入土性能和碎土特性^[10],经分析计算,确定马铃薯捡拾机捡拾铲入土角为 23° ,长为 1 635 mm,宽为 230 mm。

在马铃薯捡拾机实际作业过程中,仅仅依靠喂入端前方土壤与捡拾铲铲面土壤接触时的相互作用力,无法克服铲面土壤与铲面的静摩擦力,造成马铃薯前方壅土与堆薯的情况,经实际作业发现,捡拾铲上方壅土高度与与捡拾铲入土深度呈正相关。若捡拾铲入土深度较浅,虽然壅土高度较小,但马铃薯在

捡拾铲铲面易发生回滚现象,马铃薯输送效率较低,同时,在失去土壤缓冲作用下,马铃薯在输送过程中,跳跃、碰撞次数增多,马铃薯收获损伤率增大;若入土深度越深,在土壤包裹下,马铃薯在输送过程中,整体碰撞次数较少,碰撞所造成的损伤也较低,但壅土体积较大,整机前进阻力增大,工作效率降低,并且增加能耗,污染环境。

为避免捡拾装置前端壅土和堆薯,在捡拾输送链上方加装与输送链运转方向相反的链传动装置,上方固定橡胶挡板,结构如图 4 所示。当薯块、土壤和秧蔓经捡拾铲铲起后,通过输送链向后输送,上端运转方向相反的链条通过橡胶挡板推动薯块平稳地向上方移动。因此,捡拾装置很容易将马铃薯及土壤完成喂入输送操作。随着马铃薯与土壤向机器后方运动以及振动分离机构的作用下,输送链后端的土壤含量减少,为不增加马铃薯破皮率与伤薯率,链条与地面之间的倾斜角应大于输送链倾斜角。经分析计算,确定链条与地面倾斜角为 15° ,输送链与地面倾斜角为 5° 。在链条运转方向上,每 300 mm 处设置一块橡胶挡板,橡胶挡板设计成折弯的反向“L”形,减少橡胶挡板与马铃薯之间的相互作用力,降低伤薯率。

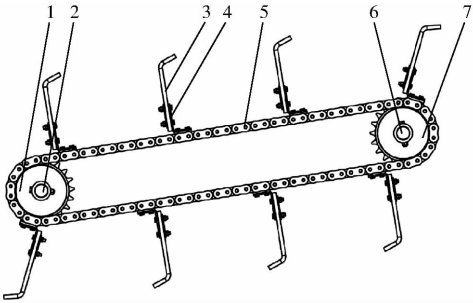


图 4 反转链装置结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of reverse chain device

- 1. 链轮 I 2. 被动轴 3. 橡胶挡板 4. 橡胶固定板 5. 链条
- 6. 主动轴 7. 链轮 II

捡拾装置喂入端经历物料喂入、喂入端壅土、橡胶挡板推走壅土的周期性过程。在壅土堆积的产生过程中, t_0 时刻喂入端壅土体积 S_{t_0} 为

$$S_{t_0} = S_{n-1} + \int_{(n-1)T}^{t_0} (s_\alpha - s_\beta) dt \tag{3}$$

式中 S_{n-1} —— $n-1$ 次拨板工作后,捡拾装置前端剩余的壅土体积, m^3

t_0 ——壅土堆积产生过程中的任意时刻,s

T ——完成一个周期所用的时间,s

n ——橡胶挡板经过前端的次数

s_α ——捡拾装置前端进入的物料速度, m^3/s

s_β ——物料被输送链带走的速度, m^3/s

在一个周期中,当 $t_0 = nT$ 时,壅土体积最大,即

$$S_{nT} = S_{\max} = S_{n-1} + \int_{(n-1)T}^{nT} (s_{\alpha} - s_{\beta}) dt \quad (4)$$

为达到向后运输物料、防止壅土的目的,以薯块质心为坐标原点、捡拾铲向后输送方向为 x 轴正方向、捡拾铲法线方向为 y 轴正方向建立坐标系,对铲面上薯块进行受力分析^[11],如图 5 所示。图中椭圆形表示马铃薯薯块,不同的圆形表示土块,平行四边形表示橡胶挡板。

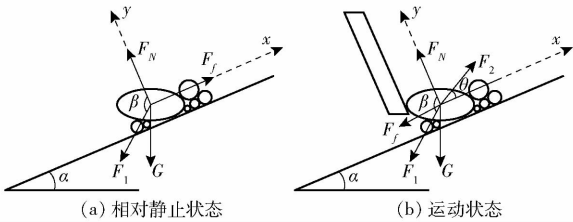


图 5 薯块相对静止状态与运动状态受力分析

Fig. 5 Force analysis of tuber in relative static state and moving state

相对静止状态下马铃薯薯块动力学方程为

$$ma_{x1} = F_f - F_1 \cos \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) - G \sin \alpha = 0 \quad (5)$$

$$ma_{y1} = F_N - G \cos \alpha - F_1 \cos \left(\pi - \beta \right) = 0 \quad (6)$$

其中

$$F_f = \mu F_N \quad (7)$$

运动状态下马铃薯薯块的动力学方程为

$$ma_{x2} = F_2 \cos \theta - F_f - F_1 \cos \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) - G \sin \alpha \quad (8)$$

$$ma_{y2} = F_N + F_2 \sin \theta - F_1 \sin \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) - G \cos \alpha \quad (9)$$

式中 m ——马铃薯薯块质量,kg

G ——马铃薯薯块重力,N

a_{x1} 、 a_{x2} ——捡拾铲 x 轴上的加速度, m/s^2

a_{y1} 、 a_{y2} ——捡拾铲 y 轴上的加速度, m/s^2

μ ——马铃薯块与接触面的滑动摩擦因数

F_f ——马铃薯与接触面的摩擦力,N

F_N ——接触面对马铃薯的支持力,N

F_1 ——物料其他部分对马铃薯的作用合力,N

F_2 ——橡胶挡板对马铃薯的作用力,N

为保证马铃薯顺利输送,则 $a_{x2} > 0$,即

$$F_2 \cos \theta - F_f - F_1 \cos \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) - G \sin \alpha > 0 \quad (10)$$

得出 $F_2 > \left[F_f + F_1 \cos \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) + G \sin \alpha \right] / \cos \theta$ 。

为增强薯土分离效果,加快土壤从杆间隙筛落的速度,在输送链中间的左右两侧各加装一个抖动轮^[12-13]。捡拾装置末端设计摘秧辊,摘秧辊表面采用橡塑材料,增大摩擦力的同时提高摘秧效率^[14]。

3 仿真试验

为确定自走式马铃薯捡拾机捡拾装置最佳工作

参数,对捡拾装置进行离散元仿真试验^[15]。

3.1 离散元模型建立

考虑到北方一季作区沙壤土特性,采用 4 球具模型建立土壤颗粒,每个小球颗粒为 1 mm。考虑到马铃薯形状对损伤率影响效果有区别,分别建立类球形马铃薯与椭球形马铃薯,并采用颗粒填充。土壤、类球形马铃薯与椭球形马铃薯离散元模型分别如图 6 所示。

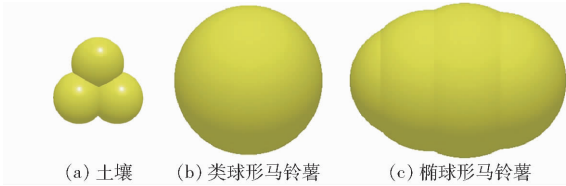


图 6 离散元颗粒模型

Fig. 6 Discrete element particle model

根据实际作业环境并简化后,将类球形与椭球形马铃薯分别分为大、中、小 3 个等级,质量分布如表 2 所示。

表 2 马铃薯质量分布设定

Tab. 2 Mass distribution setting of potatoes		
种类	质量/kg	占比/%
类球形-小	0.12	10
类球形-中	0.32	30
类球形-大	0.52	10
椭球形-小	0.15	10
椭球形-中	0.35	30
椭球形-大	0.55	10

经马铃薯挖掘机挖掘后,实际工作地块的测量,建立土垄模型如图 7 所示。其中,土壤颗粒堆积的类梯形横截面土垄长 5 m,底宽 1.6 m,高度 0.2 m;土垄上方 6 种马铃薯均匀平铺在宽 1 m、长 5 m 的平面上。

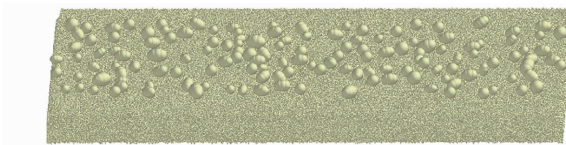


图 7 土垄与马铃薯分布离散元模型

Fig. 7 Discrete element model of soil ridge and potato distribution

离散元仿真参数设定如表 3、4 所示^[16-19],颗粒间的接触模型采用 Hertz - Mindlin (no slip) 模型。

表 3 基本参数

Tab. 3 Basic parameters				
参数	土	马铃薯	Q235 钢	橡胶板
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 210	1 080	7 850	1 800
泊松比	0.25	0.47	0.3	0.3
剪切模量/MPa	1	1.05	7.8×10^4	38.46

表 4 相互作用参数
Tab.4 Interaction parameters

物体-物体	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
土-土	0.13	0.56	0.27
薯-薯	0.66	0.48	0.024
土-钢	0.17	0.40	0.30
薯-钢	0.79	0.44	0.27
薯-橡胶板	0.71	0.40	0.25
土-薯	0.53	0.45	0.01
土-橡胶板	0.10	0.60	0.50

3.2 离散元试验可行性验证

将不装有反转链的捡拾装置进行离散元仿真，对仿真所产生壅土曲线测定后，与装置相同工作参数设定下的实测壅土曲线进行对比。

在捡拾铲入土深度为 100 mm、捡拾装置前进速度为 0.6 m/s 时，田间试验得到的捡拾装置前方壅土情况实际表现如图 8 所示。



图 8 壅土田间试验
Fig.8 Field experiment of hilling

将 SoildWorks 绘制的三维模型轻简化后，保存为. xt 格式后，导入 EDEM 之前保存到土垄模型中，设置模型材料、位置与运动，保持与实际田间壅土试验相同的入土深度和捡拾装置前进速度，仿真效果如图 9 所示。

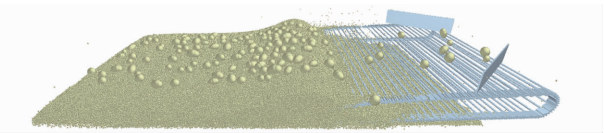


图 9 壅土仿真试验
Fig.9 Simulation of hilling

分别对田间试验的壅土高度轮廓曲线进行实测并使用 EDEM 后处理中的 Ruler 工具对仿真试验中的壅土高度轮廓曲线进行测量。以捡拾铲铲尖为原点，以重力方向反方向为 y 轴正方向，机具前进方向的反方向为 x 轴正方向，建立二维直角坐标系，使用 Matlab 对联合仿真得到的壅土曲线进行五次多项式拟合，绘制出实测与仿真拟合壅土曲线对比图如图 10 所示。

从图 10 可以看出，仿真曲线与实测曲线具有较高的相似度，因此，本仿真试验结果具有参考价值。

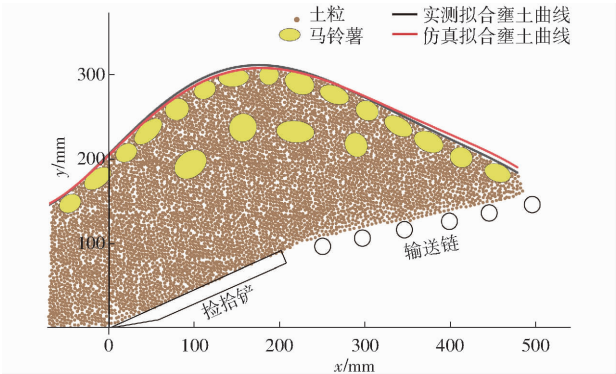


图 10 壅土曲线对比
Fig.10 Comparison of hilling curve

3.3 捡拾装置最优工作参数测定

自走式马铃薯捡拾机捡拾装置做为整机的一部分，应配合整机完成对马铃薯的捡拾喂入、薯土分离以及一级输送。在捡拾装置工作状态下，整机前进速度、捡拾铲入土深度、捡拾装置输送链线速度和反转链线速度是影响捡拾装置工作效率与马铃薯伤薯率平衡的关键指标。根据马铃薯收获机械的设计经验与研究成果，结合自走式马铃薯捡拾机搭载的发动机输出功率和实际工况，整机前进速度应保持在 0.5 ~ 0.7 m/s，捡拾铲入土深度保持在 80 ~ 120 mm，捡拾装置输送链线速度应保持在 1.1 ~ 1.2 m/s^[20]。根据分析可得，若反转链线速度小于捡拾装置输送链线速度，在二者相对速度的作用下，橡胶挡板会阻碍马铃薯在输送链上的输送，易造成壅薯现象；若反转链线速度过大，极易引发伤薯，因此，将捡拾装置反转链线速度控制在 1.2 ~ 1.3 m/s。

将使用 SolidWorks 绘制的装有反转链的捡拾装置三维模型轻简化后，保存为. xt 格式导入 RecurDyn 软件。在 RecurDyn 中添加约束、接触与运动后，导出. wall 文件并将其导入 EDEM 中，设置仿真步长为 0.01 s，进行联合仿真^[21-23]，如图 11 所示。

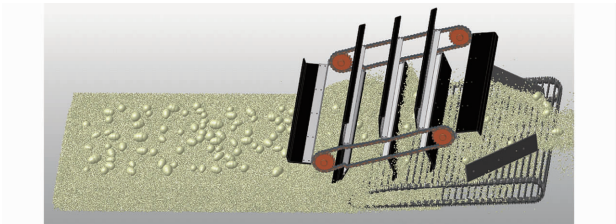


图 11 EDEM - RecurDyn 联合仿真
Fig.11 EDEM - RecurDyn joint simulation

参照文献[20,24]，结合实际测试结果可知，马铃薯的碰撞受力大于等于 200 N 时，马铃薯表现出内部出现裂缝、组织液流出的现象，均伤及薯肉，即视为伤薯。仿真结束后，在 EDEM 中，观测马铃薯受

力情况。当捡拾装置前进速度为 0.6 m/s、捡拾铲入土深度为 100 mm、捡拾装置输送链线速度为 1.15 m/s、反转链线速度为 1.25 m/s, 仿真时间为 1.34 s 时, 马铃薯受力情况如图 12 所示。从图 12 可以看出, 在捡拾装置前端, 当橡胶挡板刚与马铃薯发生接触时, 马铃薯受力明显较高, 多为 100 N 左右; 且小部分马铃薯受力达到 200 N, 超过损伤临界值。在捡拾装置中段, 少部分马铃薯发生输送过程中的碰撞, 受力在 50 N 左右, 未达到损伤临界值, 但可能造成一定程度的破皮。

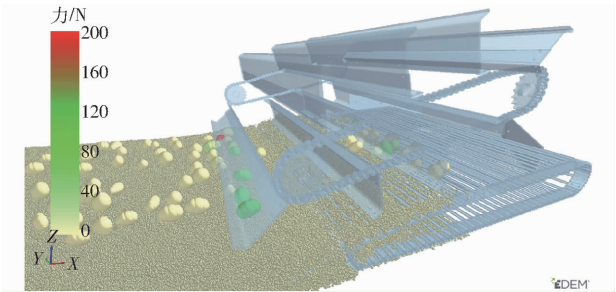


图 12 马铃薯受力情况
Fig.12 Stress situation of potatoes

参考 NY/T 2464—2013《马铃薯收获机作业质量》和 DB64/T 1795—2021《马铃薯机械化捡拾技术规程》统计计算仿真试验的伤薯率 L_s , 计算式为

$$L_s = \frac{Q_s}{Q_j + Q_l} \times 100\% - L_{ys} \tag{11}$$

式中 Q_s ——伤薯质量, kg
 Q_j ——捡拾机捡拾的马铃薯质量, kg
 Q_l ——漏拾薯质量, kg
 L_{ys} ——原始伤薯率, %

此外, 为保证整机伤薯率满足规程中所规定的小于等于 6%, 捡拾装置伤薯率小于等于 3%。在保证伤薯率达标的同时, 捡拾装置的作业效果是影响整机作业效率的关键因素, 也是评价装置设计的重要指标, 在本文的仿真试验中, 以整个仿真过程中, 马铃薯在捡拾装置上的质量流量 q_m 作为装置作业效率的评价指标, 计算式为

$$q_m = \frac{M}{t} \tag{12}$$

式中 M ——捡拾装置作业 5 m 输送链输送完成的马铃薯总质量, kg
 t ——捡拾装置作业 5 m 所需要的时间, s

据此, 采用 Box - Behnken 试验设计原理, 以捡拾装置前进速度、捡拾铲入土深度、捡拾装置输送链线速度和反转链线速度为自变量, 马铃薯流量和伤薯率为响应值, 各试验因素编码如表 5 所示。最终试验结果如表 6 所示^[25], X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为编码值。

表 5 因素编码
Tab.5 Coding of factors

编码	因素			
	捡拾装置前进速度	捡拾铲入土深度	捡拾装置输送链线速度	反转链线速度 x_4
	$x_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	x_2 / mm	$x_3 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
-1	0.50	80	1.10	1.20
0	0.60	100	1.15	1.25
1	0.70	120	1.20	1.30

表 6 试验结果
Tab.6 Experiment results

序号	因素				马铃薯流量	伤薯率
	X_1	X_2	X_3	X_4	$Y_1 / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$Y_2 / \%$
1	-1	-1	0	0	4.39	3.47
2	1	-1	0	0	5.91	3.73
3	-1	1	0	0	4.07	2.27
4	1	1	0	0	5.57	2.33
5	0	0	-1	-1	4.83	2.30
6	0	0	1	-1	5.14	2.50
7	0	0	-1	1	4.92	2.83
8	0	0	1	1	5.18	3.57
9	-1	0	0	-1	4.21	2.40
10	1	0	0	-1	5.61	2.43
11	-1	0	0	1	4.35	3.03
12	1	0	0	1	5.73	3.33
13	0	-1	-1	0	4.99	2.87
14	0	1	-1	0	4.75	2.23
15	0	-1	1	0	5.22	3.87
16	0	1	1	0	5.12	2.43
17	-1	0	-1	0	3.96	2.53
18	1	0	-1	0	5.50	2.70
19	-1	0	1	0	4.43	2.77
20	1	0	1	0	6.00	2.93
21	0	-1	0	-1	5.10	3.20
22	0	1	0	-1	4.79	2.20
23	0	-1	0	1	5.16	3.90
24	0	1	0	1	5.07	2.47
25	0	0	0	0	5.01	2.57
26	0	0	0	0	5.01	2.57
27	0	0	0	0	5.02	2.60
28	0	0	0	0	5.04	2.60
29	0	0	0	0	5.05	2.67

使用 Design-Expert 10.0.1 软件对马铃薯流量 Y_1 和伤薯率 Y_2 进行试验结果分析, 得到 Y_1 和 Y_2 二次回归模型为

$$Y_1 = 5.03 + 0.74X_1 - 0.12X_2 + 0.18X_3 + 0.061X_4 - 0.005X_1X_2 + 0.0075X_1X_3 - 0.005X_1X_4 + 0.035X_2X_3 + 0.055X_2X_4 - 0.012X_3X_4 - 0.047X_1^2 + 0.0045X_2^2 - 0.008X_3^2 - 0.00175X_4^2 \tag{13}$$

$$Y_2 = 2.6 + 0.082X_1 - 0.59X_2 + 0.22X_3 + 0.34X_4 - 0.05X_1X_2 - 0.025X_1X_3 + 0.068X_1X_4 - 0.2X_2X_3 - 0.11X_2X_4 + 0.13X_3X_4 + 0.094X_1^2 + 0.22X_2^2 + 0.045X_3^2 + 0.12X_4^2 \tag{14}$$

回归方程方差分析结果如表 7 所示。

表 7 回归方程方差分析

Tab.7 Variance analysis of regression equations

来源	马铃薯流量 Y_1				伤薯率 Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	7.24	14	118.97	<0.000 1 **	6.95	14	38.38	<0.000 1 **
X_1	6.62	1	1 522.22	<0.000 1 **	0.08	1	6.18	0.026 1 *
X_2	0.16	1	37.58	<0.000 1 **	4.21	1	325.53	<0.000 1 **
X_3	0.38	1	87.81	<0.000 1 **	0.57	1	43.87	<0.000 1 **
X_4	0.044	1	10.22	0.006 5 **	1.40	1	108.25	<0.000 1 **
X_1X_2	1.000×10^{-4}	1	0.023	0.881 6	1.000×10^{-2}	1	0.77	0.394 2
X_1X_3	2.250×10^{-4}	1	0.052	0.823 3	2.500×10^{-5}	1	1.932×10^{-3}	0.965 6
X_1X_4	1.000×10^{-4}	1	0.023	0.881 6	0.018	1	1.41	0.255 1
X_2X_3	4.900×10^{-3}	1	1.13	0.306 3	0.16	1	12.36	0.003 4 **
X_2X_4	0.012	1	2.78	0.117 4	0.046	1	3.57	0.079 6
X_3X_4	6.250×10^{-4}	1	0.14	0.710 2	0.073	1	5.63	0.032 5 *
X_1^2	0.014	1	3.26	0.092 4	0.057	1	4.39	0.054 8
X_2^2	1.314×10^{-4}	1	0.030	0.864 5	0.33	1	25.34	0.000 2 **
X_3^2	4.151×10^{-4}	1	0.096	0.761 8	0.013	1	1.01	0.332 5
X_4^2	1.986×10^{-5}	1	4.571×10^{-3}	0.947 1	0.099	1	7.66	0.015 1 *
残差	0.061	14			0.18	14		
失拟项	0.060	10			0.17	10		
误差	1.320×10^{-3}	4			6.680×10^{-3}	4		
总和	7.30	28			7.13	28		

注：**表示极显著($P < 0.01$)；*表示显著($P < 0.05$)。

由表 6 可知, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 对马铃薯流量 Y_1 影响极显著; X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_2X_3 、 X_2^2 对伤薯率 Y_2 影响极显著, X_1 、 X_3X_4 、 X_4^2 对伤薯率影响显著。分别剔除对回归方程不显著回归项($P > 0.05$),对回归方程进行优化^[26-27],得到优化后回归方程为

$$Y_1 = 5.00 + 0.74X_1 - 0.12X_2 + 0.18X_3 + 0.061X_4$$

(15)

$$Y_2 = 2.68 + 0.082X_1 - 0.59X_2 + 0.22X_3 + 0.34X_4 - 0.20X_2X_3 + 0.13X_3X_4 + 0.20X_2^2 + 0.10X_4^2$$

(16)

由式(15)、(16)可知,该自走式马铃薯捡拾机捡拾装置前进速度、捡拾铲入土深度、输送链线速度和反转链线速度均对马铃薯流量和伤薯率有影响。4 个因素的交互作用对马铃薯流量的影响不大,但捡拾铲入土深度和输送链线速度的交互作用对伤薯率影响较大;输送链线速度和反转链线速度的交互作用对伤薯率有影响。为分析以上两种交互作用对该自走式马铃薯捡拾机捡拾装置伤薯率的影响,利用 Design-Expert 10.0.1 软件分别绘制出捡拾铲入土深度、输送链线速度和输送链线速度、反转链线速度影响伤薯率的响应曲面,如图 13、14 所示。

由图 13 可看出,捡拾铲入土深度由 80 mm 增至 120 mm,输送链线速度由 1.2 m/s 减至 1.1 m/s 时,捡拾装置伤薯率不断降低;当入土深度逐渐增大时,

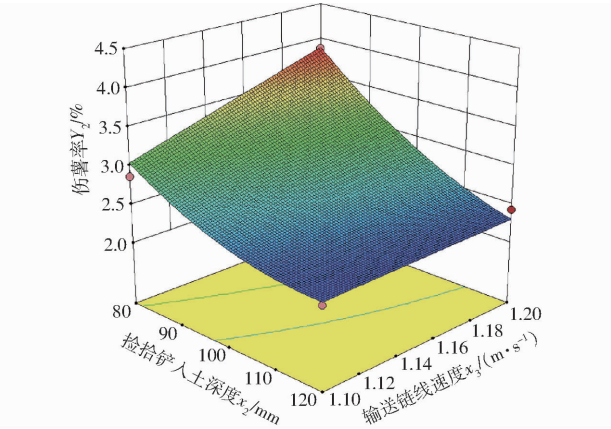


图 13 捡拾铲入土深度与输送链线速度对伤薯率的影响

Fig.13 Impact of pickup shovel depth into soil and linear speed of conveyor chain on rate of potato damage rate

输送链线速度对伤薯率的影响效果逐渐减小。发生上述现象的原因是捡拾铲入土深度越大,捡拾装置所喂入的土薯混合物中,土壤比重增大,在土壤的作用下,马铃薯在捡拾装置上的运动得到一定的缓冲保护作用,因此,伤薯率得到有效的降低。同时,捡拾铲入土深度越大,马铃薯在输送链上所受到的土壤缓冲保护时间越长,因此,输送链线速度对马铃薯的损伤影响效果逐渐减小。

由图 14 可以看出,当反转链线速度由 1.2 m/s 增至 1.3 m/s,输送链线速度由 1.1 m/s 增至 1.2 m/s 时,捡拾装置伤薯率不断增大。原因是当

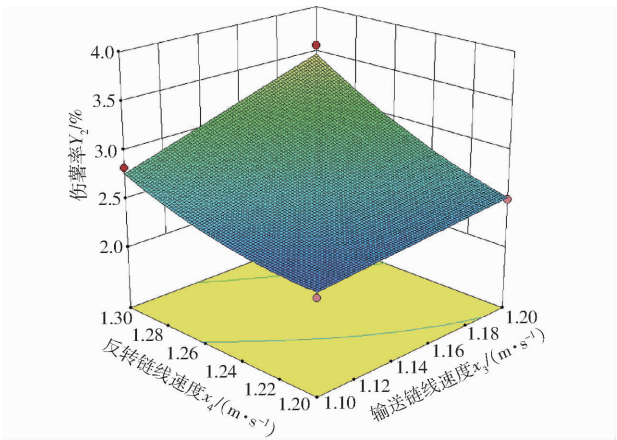


图 14 反转链线速度与输送链线速度对伤薯率的影响
Fig. 14 Impact of linear speed of reverse chain and conveyor chain on rate of potato damage rate

反转链和输送链线速度不断增大时,马铃薯在短时间内获得的动能不断增大,造成马铃薯发生翻滚、跳跃的几率增大,碰撞次数增多,因此马铃薯伤薯率不断增大。

利用 Design-Expert 10.0.1 软件中的优化求解器对剔除不显著回归项的回归方程进行优化求解。设置约束条件

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \\ -1 \leq X_4 \leq 1 \\ 0 \leq Y_1 \leq 6.62 \text{ kg/s} \\ 0 \leq Y_2 \leq 3\% \end{cases} \quad (17)$$

得出理论最优解:捡拾装置前进速度为 0.70 m/s、捡拾铲入土深度为 120 mm、捡拾装置输送链线速度为 1.20 m/s、反转链线速度为 1.20 m/s 时,可得马铃薯流量 5.75 kg/s,捡拾装置伤薯率 2.01%。

4 田间试验

试验于 2022 年 8 月在中机美诺固安分公司试验田进行(图 15)。试验地为垄播旱地种植模式,垄距 900 mm,马铃薯品种为大西洋。试验前 3 d,对马铃薯进行杀秧处理。由中机美诺 1600 型马铃薯挖掘机挖掘后,使用自走式马铃薯捡拾机进行捡拾试验。实测值与理论值对比如表 8 所示。



图 15 田间试验
Fig. 15 Field experiment

表 8 实测值与理论值对比

Tab. 8 Comparison between measured and theoretical values		
项目	马铃薯流量 $Y_1/(kg \cdot s^{-1})$	伤薯率 $Y_2/\%$
实测值	5.94	2.10
理论值	5.75	2.01
相对误差/%	3.30	4.48

由表 8 可知,最终试验验证中马铃薯流量与伤薯率与理论优化值的相对误差不大于 4.48%,有效解决了捡拾装置前方壅土问题并且符合规程要求。

5 结论

(1)为解决马铃薯捡拾装置前方壅土问题,设计一种反转夹持链,实现了对前方薯土混合物的夹持输送。

(2)使用 EDEM-RecurDyn 联合仿真,实现对薯土混合物在捡拾装置上输送状态的仿真。使用 Design-Expert 10.0.1 软件分别以捡拾装置前进速度、捡拾铲入土深度、输送链线速度和反转链线速度为自变量,以马铃薯流量和伤薯率为因变量,计算出二次多项式回归模型。对回归模型进行优化处理后,得到该自走式马铃薯捡拾机最佳工作参数为:捡拾装置前进速度为 0.70 m/s、捡拾铲入土深度为 120 mm、捡拾装置输送链线速度为 1.20 m/s、反转链线速度为 1.20 m/s。

(3)使用最优参数进行田间试验后,得出该自走式马铃薯捡拾机捡拾装置马铃薯流量为 5.94 kg/s,伤薯率为 2.10%。有效解决了捡拾装置前方壅土问题并且符合规程要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 吕金庆,杨晓涵,吕伊宁,等. 马铃薯挖掘机升运分离过程块茎损伤机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1):103-113.

- LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, LÜ Yining, et al. Analysis and experiment of potato damage in process of lifting and separating potato excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(1):103–113. (in Chinese)
- [3] 杨小平,魏宏安,赵武云,等. 4U–1600 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 Xiaoping, WEI Hongan, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of 4U–1600 set of pile type potato digger[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(6):83–92. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 魏忠彩,李洪文,孙传祝,等. 振动与波浪二级分离马铃薯收获机改进[J]. 农业工程学报, 2018,34(12):42–52. WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuazhu, et al. Improvement of potato harvester with two segment of vibration and wave separation[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12):42–52. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 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 Jiasheng, SHANG Shuqi. Development and experiment of double-row self-propelled carrots combine[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(12):38–43. (in Chinese)
- [8] 顾峰玮,胡志超,吴惠昌,等. 4LT–A 型错行作业挖掘甜菜联合收获机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014,30(23):1–9. GU Fengwei, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Development and experiment of 4LT–A staggered-dig sugar beer combine [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23):1–9. (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 Chuazhu, 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] 李涛,周进,徐文艺,等. 4UGS2 型双行甘薯收获机的研制[J]. 农业工程学报, 2018,34(11):26–33. LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Development of 4UGS2 type double-row sweet potato harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(11):26–33. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 张兆国,王法安,张永成,等. 自走式三七收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016,47(增刊):234–240. ZHANG Zhaoguo, WANG Faan, ZHANG Yongcheng, et al. Design and experiment of self-propelled *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):234–240. (in Chinese)
- [13] 吕金庆,孙贺,兑瀚,等. 粘重土壤下马铃薯挖掘机分离输送装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017,48(11):146–155. LÜ Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(11):146–155. (in Chinese)
- [14] 吕金庆,王鹏榕,刘志峰,等. 马铃薯收获机薯秧分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(6):100–109. LÜ Jinqing, WANG Pengrong, LIU Zhifeng, et al. Design and experiment of potato harvester potato stem separation equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(6):100–109. (in Chinese)
- [15] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021,52(4):1–20. ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(4):1–20. (in Chinese)
- [16] 冯斌,孙伟,石林榕,等. 收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2017,33(13):50–57. FENG Bin, SUN Wei, SHI Linrong, et al. Determination of restitution coefficient of potato tubers collision in harvest and analysis of its influence factors[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1):50–57. (in Chinese)
- [17] 温翔宇,袁洪方,王刚,等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(2):115–122,142. WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(2):115–122,142. (in Chinese)
- [18] 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 Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, 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. (in Chinese)
- [19] 杨小平,石林榕,臧金,等. 水重力式马铃薯静摩擦因数测定仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(3):167–174,320.

YANG Xiaoping, SHI Linrong, ZANG Jin, et al. Design and test of water gravity-based potato static friction coefficient determination device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3):167 – 174,320. (in Chinese)

[20] 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 Gouliang, 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)

[21] 胡建平,潘杰,陈凡,等. 基于 EDEM – RecurDyn 的指夹式取苗爪仿真优化与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):75 – 85,301.

HU Jianping, PAN Jie, CHEN Fan, et al. Simulation optimization and experiment of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM – RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(5):75 – 85,301. (in Chinese)

[22] 牛丛,徐丽明,马帅,等. 沟栽葡萄防寒布覆土卧式刷辊清除装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(23):301 – 306.

NIU Cong, XU Liming, MA Shuai, et al. Design and experiment of the horizontal brush roll soil clearing device for covering soil above the cold-proof cloth of furrow planting grape[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 301 – 306. (in Chinese)

[23] 马帅,徐丽明,袁全春,等. 自动避障式葡萄藤防寒土清土机研制[J]. 农业工程学报,2020,36(7):1 – 10.

MA Shuai, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Development of automatic obstacle-avoiding grapevine cold-proof soil cleaners[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 1 – 10. (in Chinese)

[24] 高迎旺. 马铃薯隐形损伤的生物散斑活性特征及检测研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.

GAO Yingwang. Study on biospeckle activity and detection of potato invisible damages[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

[25] 申海洋,王冰,胡良龙,等.4UZL – 1 型甘薯联合收获机薯块交接输送机构设计[J]. 农业工程学报, 2020,36(17):9 – 17.

SHEN Haiyang, WANG Bing, HU Lianglong, et al. Design of potato connecting and conveying mechanism for 4UZL – 1 type sweet potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 9 – 17. (in Chinese)

[26] 陈小冬,胡志超,王冰,等. 单垄单行甘薯联合收获机薯秧分离机构设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2019,35(14): 12 – 21.

CHEN Xiaodong, HU Zhichao, WANG Bing, et al. Design and parameter optimization of sweet-potato-stalk separator for single row sweet potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 12 – 21. (in Chinese)

[27] 张学军,白圣贺,靳伟,等. 气力式矮密栽培红枣捡拾机研制[J]. 农业工程学报,2019,35(12):1 – 9.

ZHANG Xuejun, BAI Shenghe, JIN Wei, et al. Development of pneumatic collecting machine of red jujube in dwarfing and closer cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 1 – 9. (in Chinese)