

自走式马铃薯捡拾装袋机设计与试验

杨德秋^{1,2} 汪 昕^{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: 针对马铃薯分段收获中, 人工捡拾劳动强度大、效率低、成本高的问题, 设计了一种自走式马铃薯捡拾装袋机。该自走式马铃薯捡拾装袋机能一次性完成马铃薯捡拾、薯土分离、除秧和装袋的工作。阐述了自走式马铃薯捡拾装袋机整体结构, 并对捡拾装置、升运链装置、三级输送链装置、分拣台以及卸料装置等关键部件进行详细设计; 运用 DEM-MBD 耦合的方法对马铃薯在两级输送链交接处的运动过程及受力情况进行分析; 运用 Box-Behnken 试验方法, 以漏薯率和伤薯率为评价指标, 以整机前进速度、捡拾装置输送链线速度、升运链线速度、三级输送链线速度为试验因素, 对该机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, 绘制响应面, 并得出该机最优工作参数。田间试验表明: 当前进速度为 0.70 m/s、捡拾装置输送链线速度为 1.10 m/s、升运链线速度为 1.20 m/s、三级输送链线速度为 1.30 m/s 时, 漏薯率为 2.82%, 伤薯率为 3.61%, 满足马铃薯捡拾收获作业要求。

关键词: 马铃薯; 分段收获; 马铃薯捡拾装袋机; 离散元; 多体动力学

中图分类号: S225.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)01-0085-11

OSID:



Design and Experiment of Self-propelled Potato Collecting and Bagging Machine

YANG Deqiu^{1,2} WANG Xin^{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: A self-propelled potato collecting and bagging machine was designed to address the issues of high labor intensity, low efficiency, and high cost in manual picking during potato segmented harvesting. The self-propelled potato collecting and bagging machine can complete the tasks of potato picking, potato soil separation, seedling removal, and bagging in one go. Elaborating on the overall structure of the self-propelled potato collecting and bagging machine, a detailed design of key components such as the picking device, lifting chain device, third conveyor chain device, sorting table, and unloading device was provided; the DEM-MBD coupling method was used to analyze the movement process and force situation of potatoes at the intersection of two conveying chains; the Box-Behnken test method was used to carry out four factors and three levels experimental research on the working parameters of the machine, with the potato leakage rate and the potato damage rate as the evaluation indicators, and the forward speed of the machine, the linear speed of the picking device conveyor chain, the lifting chain, and the third conveyor chain as the test factors. The quadratic polynomial regression model was established by using Design-Expert software. After optimizing the regression model, response surfaces were drawn and the optimal operating parameters of the machine were obtained. Finally, field experiments showed that when the forward speed of the machine was 0.70 m/s, the conveying chain speed of the picking device was 1.10 m/s, the lifting chain speed was 1.20 m/s, and the third conveying chain speed was 1.30 m/s, the potato leakage rate was 2.82% and the potato damage rate was 3.61%, which met the requirements of potato collecting operations.

Key words: potato; segmented harvesting; potato collecting and bagging machine; discrete element; multi-body dynamics

收稿日期: 2023-06-05 修回日期: 2023-06-30

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: 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

马铃薯机械化收获分为分段收获与联合收获。受马铃薯栽培模式和机械化发展程度的影响,欧美发达国家马铃薯机械化收获绝大部分为联合收获,能一次性完成从挖掘到装车的收获流程,但由于马铃薯联合收获机价格较高且伤薯率较高,一直很难在我国推广应用。因此,国内大部分采用分段式马铃薯机械化收获。分段式马铃薯机械化收获是指先对马铃薯进行杀秧,然后使用马铃薯挖掘机将马铃薯从地下挖掘出来,进行薯土分离、输送并铺放于地面上,最后完成捡拾装袋^[1-3]。其中,在分段式马铃薯机械化收获的最后道工序——马铃薯捡拾中,即使在种植农艺规范、机械化基础最好的北方一季作区,仍采用人工完成捡拾装袋。人工捡拾装袋劳动强度大,费时费力。并且,随着近年来农村人口老年化现象的加剧、劳动力成本不断升高,用工难、成本高等问题日益突出,捡拾机械化在薯业公司和种田大户中需求不断增高,马铃薯捡拾机的研制和推广使用已成为必然的发展趋势。

当前,国内马铃薯捡拾机的研制与推广使用处于起步阶段,研究成果较少,市场上的成熟产品很少。肖伟中等^[4]研制了一种小型马铃薯捡拾分级机,可一次性完成马铃薯捡拾、分级、收集等工作,对中小型地块适应性较强。杨金砖等^[5]开发了单垄收获4UJ-1400型马铃薯捡拾机。时永等^[6]研制的小型马铃薯捡拾机,在田间试验中,除含杂率外,其它指标均达到国家行业标准。胡乾坤等^[7]研制的马铃薯捡拾分级一体化收获机可一次性完成2垄马铃薯的捡拾与马铃薯的3级分类。WANG等^[8]设计了一种弹齿式马铃薯捡拾装置。目前市场上的大多数马铃薯捡拾机作业效率、伤薯率和含杂率等关键指标均达不到用户满意要求。

本文按照北方一季作种植农艺要求,设计一种自走式双行马铃薯捡拾装袋机,该马铃薯捡拾装袋机能一次性完成捡拾、薯土分离、输送、除秧、升运的操作,并采用人工辅助除杂的方式进一步降低马铃薯收获的含杂率,马铃薯分拣装置可供用户自由选择吨包或者装袋。采用EDEM-RecurDyn耦合的方法,对机器易产生伤薯的关键环节进行仿真分析;采用Box-Behnken试验方法,获得机器最优的工作参数组合,并进行田间试验验证。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

自走式马铃薯捡拾装袋机主要由捡拾装置、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。

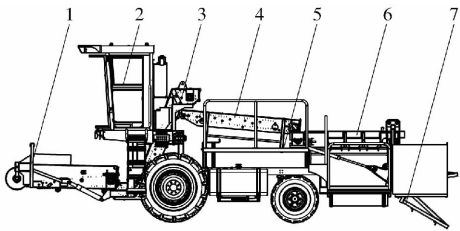


图1 自走式马铃薯捡拾装袋机整体结构图
Fig.1 Overall structure diagram of self-propelled potato collecting and bagging machine

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

该机型按照北方一季作种植区标准化的种植农艺设计,主要参数如表1所示。

表1 自走式马铃薯捡拾装袋机主要参数
Tab.1 Main parameters of self-propelled potato collecting and bagging machine

参数	数值
总体尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	8 300×2 600×3 510
配套动力/kW	110
总体质量/kg	6 480
作业幅宽/mm	1 650
前后轴距/mm	2 500

1.2 工作原理

自走式马铃薯捡拾装袋机作业时,捡拾装置中的捡拾铲铲起经马铃薯挖掘机作业后,平铺于地表的薯土秧混合物,随着输送链输送,经抖动轮抖动去土,除秧辊转动除秧,马铃薯与残余秧蔓、石块落入升运链装置;升运链装置和三级输送链装置完成升运输送至水平输送的输送过程;分拣台和卸料装置两侧的站台上,站立的4名操作人员清理残余的秧蔓、石块等杂质,并通过控制卸料装置油缸的操作按钮完成马铃薯装袋、卸袋工作。

2 关键部件设计

2.1 捡拾装置设计

捡拾装置结构示意图如图2所示,主要由切土圆盘、捡拾铲、有缘托轮、抖动调节机构、输送链、抖动轮、集薯板、梅花轮、摘秧辊组成。

马铃薯捡拾机工作的地块是经过马铃薯挖掘机挖掘过的。根据当前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^[9]。与马铃薯挖掘机相比,马铃薯捡拾机前铲的入土深度较小,整机前进阻力较小,所收起的马铃薯薯块上黏土较少,由于经过前

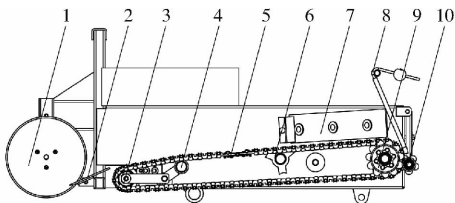


图 2 捡拾装置结构示意图

Fig. 2 Schematic of picking device structure

1. 切土圆盘 2. 捡拾铲 3. 有缘托轮 I 4. 托轮 I 5. 捡拾输送链 6. 抖动轮 7. 集薯板 8. 摘秧杆 9. 梅花轮 I 10. 摘秧辊

期马铃薯挖掘机的薯土分离,土粒、土块与薯块之间间隙增大、黏合性降低,因此,捡拾铲在工作时所受前进阻力较小,又由于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整体收获的漏薯率。研究表明,确保薯土混合物沿着挖掘铲上表面向后运动的条件为^[10]

$$P \geq G_c \tan(\theta + \varphi) \quad (1)$$

式中 P ——挖掘铲铲面掘起土壤的作用力(挖掘阻力),N

G_c ——挖掘铲铲面上薯土混合物重力,N

θ ——挖掘铲入土角, ($^\circ$)

φ ——土壤对铲面的摩擦角, ($^\circ$)

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 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。同时,为保证捡拾装置捡拾起薯垄的马铃薯,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^[11-12]

$$W_1 = L + s + 3\sigma + \varepsilon \quad (2)$$

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

结合马铃薯种植农艺,综合考虑捡拾铲入土性能和碎土特性^[13],经分析计算,确定马铃薯捡拾装袋机捡拾铲入土角度 23° ,长度 1 635 mm,宽度 230 mm。

马铃薯挖掘机与马铃薯联合收获机多采用带有动力源的主动式抖动轮完成薯土分离,考虑到捡拾装置在实际作业过程中,土壤颗粒较小、分布松散,因此采用输送链杆驱动被动式三角形抖动轮,在尽量不伤薯的情况下提高土壤分离效率^[14-15]。抖动轮运动简图如图 3 所示。

如图 3 所示,抖动轮在链杆 a 的带动下转动;运动到杆 b 位置时,达到最高点;最终运动到杆 c 位置,抖动轮带动链杆完成一个周期的振动。在一个周期中,以杆 a 所在位置为零点,重力负方向为 X 正

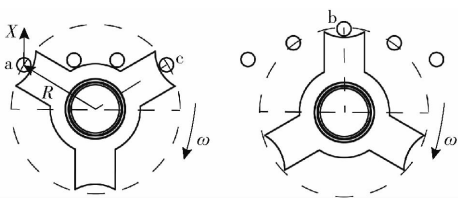


图 3 抖动轮运动简图

Fig. 3 Schematic of shaking wheel movement

方向,得到链杆 X 方向上的位移运动方程为

$$X = R \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad \left(t \in \left[0, \frac{2\pi}{3\omega}\right]\right) \quad (3)$$

其中

$$\omega = \frac{2\sqrt{3}\pi v_s}{9R} \quad (4)$$

式中 X ——链杆竖直方向上运动位移,mm

R ——链杆做圆周运动半径,取 85 mm

ω ——抖动轮圆周运动角速度,rad/s

t ——抖动轮运动时间,s

v_s ——捡拾输送链运动线速度,m/s

捡拾装置末端设计摘秧机构,摘秧机构主要由重力球、除秧杆、橡胶管、弹簧、梅花轮 I、梅花轮 II、链杆、摘秧辊组成,结构示意图如图 4 所示。捡拾装置作业时,在弹簧作用下,末端的梅花轮 II 与输送链杆夹紧,并在运动的输送链杆驱动下,梅花轮 II 和摘秧辊发生转动。秧蔓跟随输送链输送至捡拾装置末端时,在配有重力球的摘秧杆作用下,秧蔓紧贴在输送链杆表面,并在发生对转的输送链杆和摘秧辊的作用下,排出捡拾装置,排入地面。其中,摘秧杆与摘秧辊表面贴合橡胶材料,增大与秧蔓的摩擦力,提高摘秧效率^[16]。梅花轮 I 角速度 ω_2 与梅花轮 II 角速度 ω_3 的比值为 5:11。

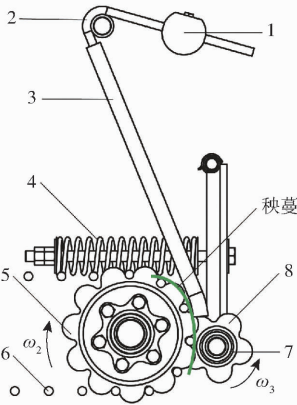


图 4 摘秧机构示意图

Fig. 4 Schematic of seedling picking mechanism

1. 重力球 2. 摘秧杆 3. 橡胶管 4. 弹簧 5. 梅花轮 I 6. 链杆 7. 橡胶辊 8. 梅花轮 II

摘秧过程中,秧蔓受力分析如图 5 所示。

在摘秧机构作用下,秧蔓竖直向下做加速运动,秧蔓动力学方程为

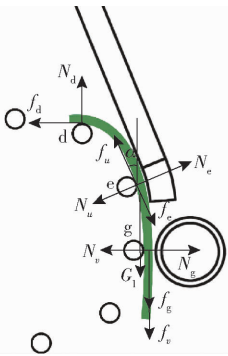


图 5 秧蔓受力分析图

Fig. 5 Stress analysis diagram of seedlings

$$f_d + (f_u - f_e) \sin \alpha + (N_u - N_e) \cos \alpha + N_v - N_g = 0 \quad (5)$$

$$m_1 a_1 = G_1 - N_d + (N_u - N_e) \sin \alpha + (f_e - f_u) \cos \alpha + f_g + f_v \quad (6)$$

式中 f_d ——秧蔓与杆 d 的摩擦力, N
 f_u ——秧蔓与摘秧杆的摩擦力, N
 f_v ——秧蔓与摘秧辊的摩擦力, N
 f_e ——秧蔓与杆 e 的摩擦力, N
 f_g ——秧蔓与杆 g 的摩擦力, N
 α —— f_u 与重力负方向的夹角, ($^\circ$)
 N_u ——摘秧杆对秧蔓的支持力, N
 N_d ——杆 d 对秧蔓的支持力, N
 N_e ——杆 e 对秧蔓的支持力, N
 N_v ——摘秧辊对秧蔓的支持力, N
 N_g ——杆 g 对秧蔓的支持力, N
 m_1 ——秧蔓质量, kg
 a_1 ——摘秧过程中秧蔓加速度, m/s^2
 G_1 ——秧蔓重力, N

2.2 升运链装置与三级输送链装置设计

升运链装置主要由有缘托轮、托轮、橡胶薯板、输送链以及梅花轮组成, 整体结构如图 6 所示。液压马达驱动梅花轮, 带动输送链在托轮的限位下运转。

升运链装置采用平-斜-平的输送链设计, 相比斜置设计, 输送链前端设置成水平输送的优点是马铃薯从与升运输送链发生跌落碰撞到随输送链稳定输送过程, 马铃薯速度方向变化较小, 能有效降低马铃薯损伤。同时, 前端的水平输送能有效减少因马铃薯在升运过程中, 发生跌落而造成漏薯现象的发生。马铃薯在捡拾装置到升运链装置的跌落过程如图 7 所示。

马铃薯从捡拾输送链抛送到与升运输送链碰撞过程中 X 方向运动距离 N 表达式为

$$N = v_x \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (7)$$

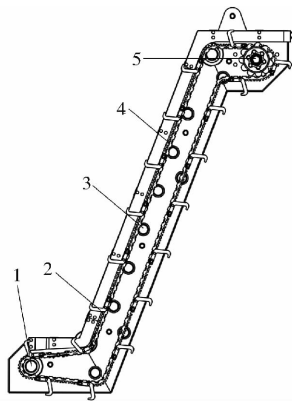


图 6 升运链装置结构示意图

Fig. 6 Schematic of lifting chain device structure

1. 有缘托轮 II 2. 橡胶薯板 3. 托轮 II 4. 升运输送链 5. 梅花轮 III

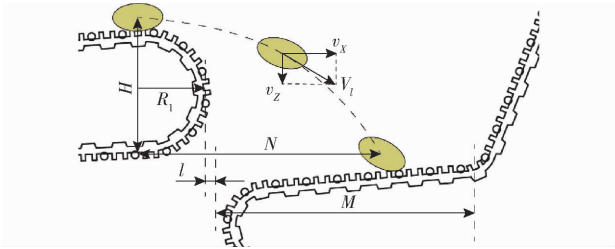


图 7 马铃薯跌落过程示意图

Fig. 7 Schematic of potato drop process

式中 v_x ——马铃薯在 X 方向的分速度, 取 1.2 m/s
 H ——马铃薯碰撞时的下落高度, 取 225 mm
 g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2
为确保马铃薯从捡拾输送链到升运链输送交接时跌落在水平输送段, 须满足 $M \geq N - R_1 - l$, 即

$$M \geq v_x \sqrt{\frac{2H}{g}} - R_1 - l \quad (8)$$

式中 M ——升运链前端水平输送段的长度, mm
 R_1 ——捡拾输送链后端圆弧半径, 取 100 mm
 l ——升运输送链前端与捡拾输送链后端距离, 取 33 mm

得出 $M \geq 125 \text{ mm}$, 为保证马铃薯在升运前输送状态平稳, 增大前端水平输送长度, 因此, M 取 400 mm 。

升运输送链每隔 300 mm , 在链杆上固定橡胶薯板, 对薯块进行升运护送。升运装置高度 2050 mm , 斜置输送段与水平段的角设计为 65° , 可有效保证马铃薯在升运过程中不发生滑落。

与升运链装置类似, 三级输送链装置主要由有缘托轮、托轮、输送链、支撑架和梅花轮组成, 整体结构如图 8 所示。薯块及残余秧蔓等在液压马达驱动的三级输送链带动下, 完成薯杂混合物在三级输送链上的输送。三级输送链装置加长了后方分拣人员的操作区域长度, 方便分拣人员对需要除去的杂物运动位置的判断, 提高分拣人员工作效率, 减少整机

含杂率。

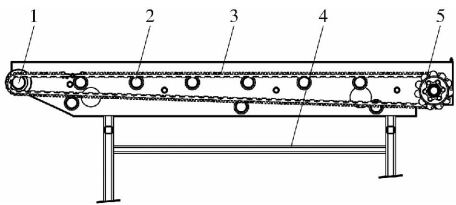


图 8 三级输送链装置结构示意图

Fig. 8 Schematic of structure of the third conveyor chain device

1. 有缘托轮Ⅲ 2. 托轮Ⅲ 3. 三级输送链 4. 支撑架 5. 梅花轮Ⅳ

2.3 分拣台及卸料装置设计

分拣台及卸料装置主要由挂袋口、输送带、分薯板Ⅰ、分薯板Ⅱ、料斗Ⅰ、料斗Ⅱ组成。整体结构如图 9 所示。当马铃薯经三级输送链输送完成后，落在由液压马达驱动的分拣台输送带表面，在摩擦力的作用下，继续向捡拾装袋机尾端运动。当分拣台两侧的操作者将分薯板Ⅰ的尾端置于 A 处、分薯板Ⅱ尾端置于 B 处时，马铃薯即可落入料斗Ⅰ上的吨包袋中。操作者可控制料斗的升降来完成吨包的装袋工作。同理，操作者也可完成料斗Ⅱ上吨包的装袋工作。当分拣台两侧的操作者将分薯板Ⅰ抬起，将分薯板Ⅱ的尾端置于 A 处时，即完成图 9 所示左侧的装小袋工作。

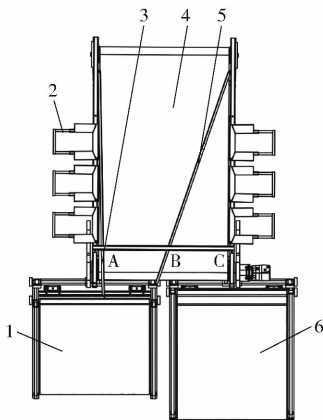


图 9 分拣台及卸料装置结构示意图

Fig. 9 Schematic of sorting table and unloading device structure

1. 料斗Ⅰ 2. 挂袋口 3. 分薯板Ⅰ 4. 输送带 5. 分薯板Ⅱ 6. 料斗Ⅱ

分拣台上输送物料绝大部分是清洁的马铃薯，根据马铃薯输送的相关参数，分拣台上输送带线速度 v_4 表达式为^[17]

$$v_4 = \frac{Q}{3\,600Sk\rho} \tag{9}$$

其中 $Q = 2LCv_m$ (10)

$$S = a_2b_1 \tag{11}$$

式中 Q ——输送带输送量, kg/h

- S ——输送带上薯块填充的横截面积, m^2
 a_2 ——薯块平均公称直径, m
 b_1 ——输送带宽度, m
 k ——输送薯块填充系数
 ρ ——薯块密度, kg/m^3
 C ——马铃薯产量, kg/hm^2
 v_m ——机具前进速度, m/s

3 输送交接处马铃薯运动分析

马铃薯在捡拾装袋机上的伤薯大部分发生在马铃薯两级输送链的交接过程中，交接处的马铃薯下落以及短时间内马铃薯的速度变化在马铃薯碰撞过程中极易造成伤薯。

为了分析马铃薯在两级输送链交接的运动过程中发生的碰撞，采用多体动力学软件 RecurDyn 和离散元软件 EDEM 耦合的方法，对马铃薯在捡拾装置输送链和升运装置输送链的交接过程进行仿真。

在 EDEM 中，分别建立球形马铃薯与椭球形马铃薯，并采用颗粒填充，马铃薯模型形状如图 10 所示。

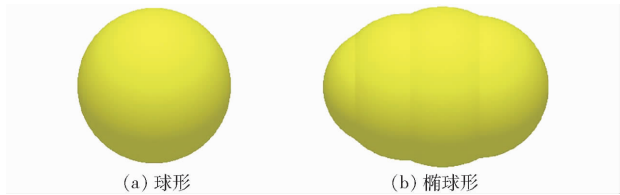


图 10 马铃薯离散元模型

Fig. 10 Discrete element particle models of potatoes

将 Solidworks 中建立的捡拾装置与升运装置输送链模型保存为 .xt 格式导入 RecurDyn 中，在 RecurDyn 中，设置约束、接触与运动，使捡拾装置输送链与升运装置输送链分别以 1.10 m/s 和 1.20 m/s 的线速度运动。将设置完成后的模型导出 .wall 文件后输入 EDEM。

根据实际作业情况，捡拾装置输送链与升运装置输送链的交接处，马铃薯与少量残余秧蔓交接输送，为简化分析过程，仅考虑马铃薯的输送过程。在 EDEM 中，一级输送链的中段建立虚拟面并添加颗粒工厂，如图 11 所示。根据马铃薯单产与机器实际作业时的前进速度，设置仿真 5 s 内，颗粒工厂产生马铃薯 30 kg，马铃薯生成速度为 6 kg/s，马铃薯初始速度沿着捡拾输送链方向，大小为 0.80 m/s。

离散元仿真参数设定如表 2、3 所示^[18-21]，颗粒间接触模型采用 Hertz - Mindlin (no slip) 模型。

2 s 时仿真界面如图 12 所示。

从仿真结果可以看出，马铃薯在一、二级输送链的交接输送过程分为 6 个阶段。各阶段运动分析如

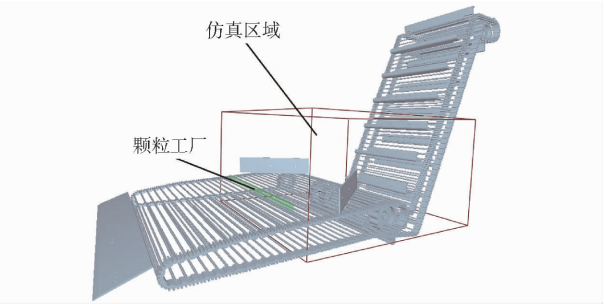


图 11 EDEM 仿真结果
Fig. 11 EDEM simulation result

表 2 仿真基本参数

Tab. 2 Basic parameters for simulation			
参数	马铃薯	Q235 钢	橡胶板
密度/(kg·m ⁻³)	1 080	7 850	1 800
泊松比	0.47	0.30	0.30
剪切模量/MPa	1.05	7.80×10 ⁴	38.46

表 3 相互作用仿真参数

Tab. 3 Interaction parameters for simulation			
项目	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
马铃薯-马铃薯	0.66	0.48	0.024
马铃薯-Q235 钢	0.79	0.44	0.27
马铃薯-橡胶板	0.71	0.40	0.25

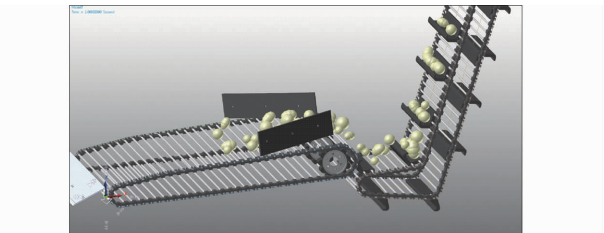


图 12 RecurDyn 仿真界面
Fig. 12 RecurDyn simulation interface

图 13 所示。

第 1 阶段:部分马铃薯在向后运动的一级输送链以及集薯板的作用下,与集薯板发生滑动摩擦,马铃薯在 XY 平面的动力学表达式为

$$\begin{cases} ma_{x1} = N_h - N_i - N_1 \sin\beta - f_1 \cos\beta \\ ma_{y1} = N_1 \cos\beta - f_1 \sin\beta - f_h - f_i \end{cases} \quad (12)$$

式中 m ——马铃薯质量,kg
 a_{x1} ——马铃薯在 X 方向的加速度,m/s²
 N_h ——杆 h 对马铃薯在 X 方向的支持力,N
 N_i ——杆 i 对马铃薯在 X 方向的支持力,N
 N_1 ——集薯板对马铃薯的支持力,N
 f_1 ——集薯板对马铃薯的摩擦力,N
 β —— f_1 与 N_i 的夹角,(°)
 a_{y1} ——马铃薯在 Y 方向的加速度,m/s²
 f_h ——杆 h 对马铃薯的摩擦力,N
 f_i ——杆 i 对马铃薯的摩擦力,N

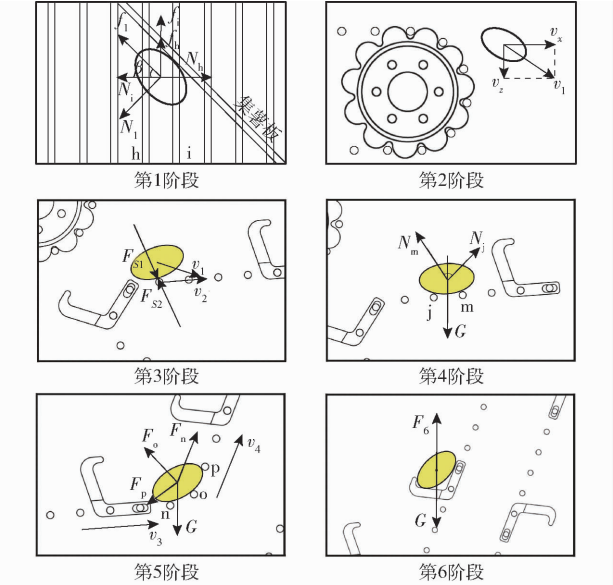


图 13 运动分析示意图
Fig. 13 Schematic of motion analysis

第 1 阶段:在 f_1 、 f_h 、 f_i 的作用下,马铃薯分别与杆 a 、杆 b 和集薯板发生摩擦,并可能导致线性擦伤。

第 2 阶段:马铃薯经由一级输送链抛送,抛送过程中马铃薯速度表达式为

$$v_1 = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \quad (13)$$

其中 $v_z = \sqrt{2gh}$ (14)

式中 v_1 ——马铃薯在 XZ 平面的合速度,m/s
 v_x ——马铃薯在 X 方向的分速度,m/s
 v_z ——马铃薯在 Z 方向的分速度,m/s
 h ——马铃薯下落高度,m

第 3 阶段:马铃薯与升运装置输送链发生直接碰撞或与橡胶薯板发生碰撞后,落在升运输送链上。其中,与升运输送链发生直接碰撞造成的伤薯情况较为严重,此时,马铃薯速度 v_1 表达式为

$$v_1 = \sqrt{v_x^2 + 2gH} \quad (15)$$

根据 Hertz 接触理论,其碰撞的等效弹性模量和等效半径分别满足

$$\begin{cases} \frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \\ \frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \end{cases} \quad (16)$$

式中 E^* ——等效弹性模量,MPa
 R^* ——等效半径,mm
 μ_1 ——马铃薯泊松比
 E_1 ——马铃薯弹性模量,MPa
 μ_2 ——输送链杆泊松比
 E_2 ——输送链杆弹性模量,MPa
 R_1 ——马铃薯半径,mm

R_2 ——输送链杆半径,mm

作用在碰撞区域的法向力 F 为^[22-23]

$$F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \delta^3} \tag{17}$$

式中 δ ——压缩变形量,mm

第 4 阶段:马铃薯在 j、m 两链杆的支撑作用下处于稳定状态,马铃薯在 XZ 平面上的受力方程式为

$$\begin{cases} N_m \sin \gamma = N_j \sin \tau \\ N_m \cos \gamma + N_j \cos \tau = G \end{cases} \tag{18}$$

式中 N_m ——链杆 m 对马铃薯的支持力,N

γ —— N_m 与重力负方向的夹角, (°)

τ —— N_j 与重力负方向的夹角, (°)

N_j ——链杆 j 对马铃薯的支持力,N

G ——马铃薯重力,N

第 5 阶段:因升运装置输送链速度由 v_3 变化为 v_4 ,马铃薯在 XZ 平面所受合力 F_5 的表达式为

$$F_5 = G + F_n + F_o + F_p \tag{19}$$

式中 F_n ——链杆 n 对马铃薯的作用力,N

F_o ——链杆 o 对马铃薯的作用力,N

F_p ——链杆 p 对马铃薯的作用力,N

由于短时间内,链杆的速度方向发生变化,在其上输送的马铃薯在合力 F_5 的作用下,可能发生碰撞、翻滚,从而造成伤薯。

第 6 阶段:在橡胶薯板的护送下,马铃薯稳定地进行升运输送,马铃薯受力表达式为

$$F_6 = G \tag{20}$$

式中 F_6 ——橡胶薯板对马铃薯的作用力,N

图 14 为 EDEM-RecurDyn 联合仿真中,典型情况下的马铃薯受力示意图。如图 14a 所示,第 1 阶段,部分马铃薯在输送链杆与集薯板的作用下产生摩擦受力;如图 14b 所示,第 3 阶段,部分马铃薯在从捡拾输送链跌落至升运输送链时,产生的碰撞力已经超过 100 N,易发生碰撞伤薯;如图 14c 所示,第 5 阶段,受升运输送链速度方向的变化,马铃薯在链杆的作用下,所受的碰撞、挤压力超过 100 N,也易发生伤薯。其他阶段,马铃薯较平稳地进行输送升运。

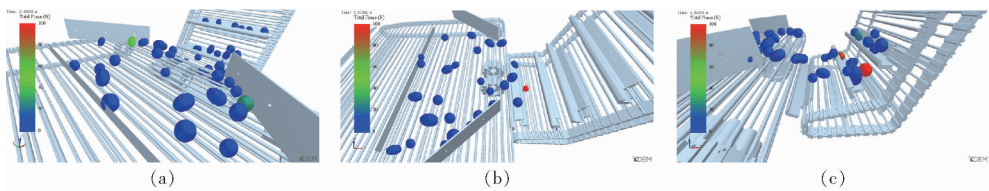


图 14 马铃薯受力仿真效果

Fig. 14 Simulation effects of potato stress

4 田间试验

2022 年 8 月在河北省张家口市沽源县进行自走式马铃薯捡拾装袋机性能试验。试验地为垄播旱地种植模式,垄距 900 mm,马铃薯品种为久恩 3 号。试验前 3 d,对马铃薯进行杀秧处理。当天,马铃薯由中机美诺 1600 型马铃薯挖掘机挖掘后,使用自走式马铃薯捡拾装袋机进行捡拾试验(图 15)。



图 15 田间试验

Fig. 15 Field experiment

4.1 回归方程建立

参考 DB64/T 1795—2021《马铃薯机械化捡拾技术规程》,使用漏薯率和伤薯率作为本试验的评

价指标。

漏薯率与伤薯率计算公式分别为

$$L_l = \frac{Q_l}{Q_j + Q_l} \times 100\% \tag{21}$$

$$L_s = \frac{Q_s}{Q_j + Q_l} \times 100\% - L_{ys} \tag{22}$$

式中 L_l ——漏薯率,%

Q_l ——漏拾薯质量,kg

Q_j ——捡拾机捡拾的马铃薯质量,kg

L_s ——伤薯率,%

Q_s ——伤薯质量,kg

L_{ys} ——原始伤薯率,%

自走式马铃薯捡拾装袋机中整机前进速度、捡拾装置输送链线速度、升运链线速度、三级输送链线速度是影响捡拾装袋机工作性能的重要参数。试验采用 Box-Behnken 试验设计原理,以整机前进速度、捡拾装置输送链线速度、升运链线速度、三级输送链线速度为自变量,漏薯率和伤薯率为响应值。综合考虑捡拾装袋机作业效率与后方分拣人员的工作强度,将整机前进速度的试验范围设定为 0.50 ~

0.70 m/s;参考多级输送链式马铃薯挖掘机与马铃薯联合收获机设计经验^[2-3,24-25],为匹配整机前进速度,防止各输送链交接处发生壅堵现象,设定各试验因素编码如表 4 所示。四因素三水平 Box - Behnken 试验方案有 29 个试验点,其中 24 个试验点为分析因子,5 个试验点为零点误差估计。对以上 29 个试验点进行每个 50 m 的测定区长度试验,且每个试验点重复 3 次,最终试验结果取 3 次试验结果的平均值。最终试验结果如表 5 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素编码值。

表 4 正交试验因素编码
Tab.4 Orthogonal experimental coding of factors

编码	因素				m/s
	整机前进速度	捡拾装置输送链线速度	升运链线速度	三级输送链线速度	
-1	0.50	1.10	1.20	1.30	
0	0.60	1.15	1.25	1.35	
1	0.70	1.20	1.30	1.40	

表 5 试验设计与结果
Tab.5 Experimental design and results

序号	因素				$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3	X_4		
1	1	0	-1	0	3.11	3.54
2	0	0	-1	1	3.31	3.65
3	0	-1	1	0	3.05	4.78
4	0	0	0	0	3.40	3.92
5	0	0	-1	-1	3.25	3.52
6	0	1	-1	0	3.49	3.49
7	0	1	0	1	3.55	3.70
8	1	-1	0	0	2.96	4.11
9	-1	0	1	0	3.53	4.57
10	1	0	0	1	3.07	3.94
11	1	1	0	0	3.13	3.59
12	0	-1	-1	0	3.15	3.49
13	0	0	1	-1	3.30	4.17
14	1	0	0	-1	2.99	3.7
15	-1	0	0	-1	3.78	3.72
16	0	0	0	0	3.35	3.87
17	0	-1	0	1	3.10	4.39
18	0	-1	0	-1	3.01	4.01
19	-1	0	-1	0	3.85	3.61
20	-1	1	0	0	3.96	3.65
21	0	0	0	0	3.28	3.82
22	0	0	0	0	3.23	3.81
23	0	0	0	0	3.22	3.78
24	-1	0	0	1	3.66	3.98
25	0	1	1	0	3.44	4.06
26	1	0	1	0	3.03	4.53
27	0	0	1	1	3.37	4.62
28	0	1	0	-1	3.6	3.56
29	-1	-1	0	0	3.45	4.24

使用 Design-Expert 10.0.1 软件对漏薯率 Y_1 和伤薯率 Y_2 进行试验结果分析,得到二次回归模型为

$$Y_1 = 3.30 - 0.33X_1 + 0.20X_2 - 0.037X_3 + 0.011X_4 - 0.085X_1X_2 + 0.060X_1X_3 + 0.050X_1X_4 + 0.012X_2X_3 - 0.035X_2X_4 + 0.0025X_3X_4 + 0.078X_1^2 - 0.0009167X_2^2 - 0.002167X_3^2 + 0.012X_4^2 \tag{23}$$
$$Y_2 = 3.84 - 0.03X_1 - 0.25X_2 + 0.45X_3 + 0.13X_4 + 0.018X_1X_2 + 0.0075X_1X_3 - 0.005X_1X_4 - 0.18X_2X_3 - 0.060X_2X_4 + 0.080X_3X_4 + 0.035X_1^2 + 0.021X_2^2 + 0.14X_3^2 + 0.0075X_4^2 \tag{24}$$

4.2 回归方程分析

回归方程方差分析如表 6 所示。由表 6 P 值可以看出: X_1 、 X_2 对漏薯率 Y_1 影响极显著, X_1X_2 、 X_1^2 对漏薯率 Y_1 影响显著; X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_2X_3 、 X_3^2 对伤薯率 Y_2 影响极显著。对回归方程进行优化。得到优化后回归方程分别为

$$Y_1 = 3.30 - 0.33X_1 + 0.20X_2 - 0.037X_3 + 0.011X_4 - 0.085X_1X_2 + 0.077X_1^2 \tag{25}$$
$$Y_2 = 3.87 - 0.03X_1 - 0.25X_2 + 0.45X_3 + 0.13X_4 - 0.18X_2X_3 + 0.13X_3^2 \tag{26}$$

通过优化后的回归方程可知,影响自走式马铃薯捡拾装袋机漏薯率的主要因素是整机前进速度与捡拾装置输送链线速度;影响机器伤薯率的主要因素有捡拾装置输送链线速度、升运链线速度和三级输送链线速度。

为分析交互因素对该漏薯率和伤薯率的影响,利用 Design-Expert 10.0.1 软件分别绘制出整机前进速度和捡拾装置输送链线速度影响漏薯率的响应曲面以及捡拾装置输送链线速度和升运链线速度影响伤薯率的响应曲面,如图 16、17 所示。

由图 16 可以看出:当马铃薯捡拾装袋机前进速度由 0.70 m/s 递减到 0.50 m/s,捡拾装置输送链线速度由 1.10 m/s 递增至 1.20 m/s 时,马铃薯漏薯率不断增大。经田间试验观察分析,当机器作业时,前进速度越小,马铃薯及土壤混合物在捡拾装置前端发生的壅堵现象越严重,马铃薯易发生向机器前进方向的滑落,并且将两侧的马铃薯挤入垄沟,造成漏薯;当捡拾装置输送链线速度越大,马铃薯在捡拾装置前端短时间内获得的动能越大,易发生马铃薯碰撞、弹跳、翻滚等现象,造成漏薯。综上,当马铃薯捡拾装袋机前进速度在 0.50 ~ 0.70 m/s 范围内越小,捡拾装置输送链线速度在 1.10 ~ 1.20 m/s 范围内越大时,漏薯率越大。

表 6 回归方程方差分析

Tab.6 Variance analysis of regression equations

来源	漏薯率 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	1.91	14	22.99	<0.000 1 **	3.72	14	40.27	<0.000 1 **
X_1	1.29	1	217.69	<0.000 1 **	0.011	1	1.64	0.221 6
X_2	0.50	1	84.17	<0.000 1 **	0.74	1	111.39	<0.000 1 **
X_3	0.016	1	2.71	0.121 7	2.46	1	372.32	<0.000 1 **
X_4	1.408×10^{-3}	1	0.24	0.633 9	0.21	1	32.33	<0.000 1 **
X_1X_2	0.029	1	4.86	0.044 7 *	1.225×10^{-3}	1	0.19	0.673 1
X_1X_3	0.014	1	2.42	0.141 9	2.250×10^{-4}	1	0.034	0.856 2
X_1X_4	0.010	1	1.68	0.215 5	1.000×10^{-4}	1	0.015	0.903 8
X_2X_3	6.250×10^{-4}	1	0.11	0.750 5	0.13	1	19.64	0.000 6 **
X_2X_4	4.900×10^{-3}	1	0.82	0.379 2	0.014	1	2.18	0.161 8
X_3X_4	2.500×10^{-5}	1	4.207×10^{-3}	0.949 2	0.026	1	3.88	0.069 0
X_1^2	0.039	1	6.61	0.022 2 *	7.946×10^{-3}	1	1.20	0.291 0
X_2^2	5.450×10^{-6}	1	9.172×10^{-4}	0.976 3	2.929×10^{-3}	1	0.44	0.516 1
X_3^2	3.045×10^{-5}	1	5.124×10^{-3}	0.943 9	0.13	1	19.61	0.000 6 **
X_4^2	8.703×10^{-4}	1	0.15	0.707 7	3.649×10^{-4}	1	0.055	0.817 5
残差	0.083	14			0.092	14		
失拟项	0.059	10	0.98	0.557 8	0.080	10	2.63	0.182 2
误差	0.024	4			0.012	4		
总和	2.00	28			3.81	28		

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

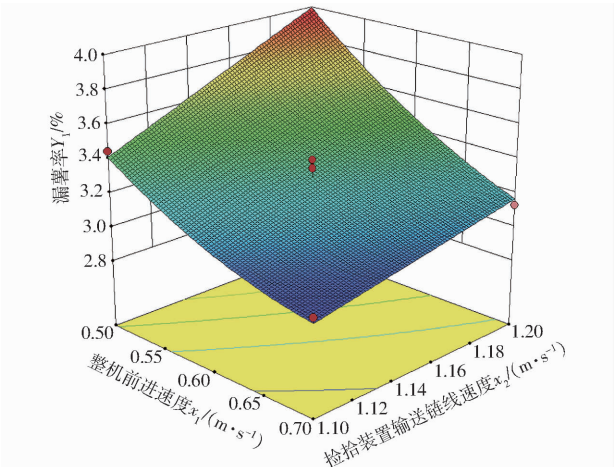


图 16 整机前进速度与捡拾装置输送链线速度对漏薯率影响的响应曲面

Fig. 16 Impact of forward velocity and pickup conveyor chain linear speed on rate of potato leakage rate

由图 17 可以看出：当捡拾装置输送链线速度由 1.20 m/s 递减至 1.10 m/s，升运链线速度由 1.20 m/s 递增至 1.30 m/s 时，伤薯率逐渐增大。结合上文中交接处的理论与仿真分析得出，捡拾装置输送链线速度越小，跌落碰撞时，马铃薯与升运链输送链杆的速度差值越大，所受的碰撞力越大，越易发生伤薯；升运链线速度越大，除易造成马铃薯跌落损伤外，在升运链由平至斜输送时，马铃薯与斜方向运

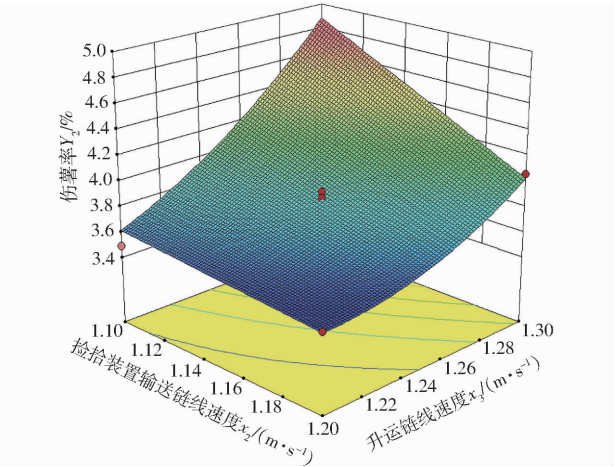


图 17 捡拾装置输送链线速度与升运链线速度对伤薯率影响的响应曲面

Fig. 17 Impact of pickup conveyor chain linear velocity and lifting chain linear velocity on rate of potato damage

动的链杆速度差值越大，越易发生伤薯。综上，当马铃薯捡拾装置输送链线速度在 1.10 ~ 1.20 m/s 范围内越小，升运链线速度在 1.20 ~ 1.30 m/s 范围内越大时，伤薯率越大。

4.3 最优参数优化与验证

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。设置目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \\ -1 \leq X_4 \leq 1 \\ 0 \leq Y_1 \leq 5\% \\ 0 \leq Y_2 \leq 6\% \end{cases} \end{cases} \quad (27)$$

得出当整机前进速度为 0.70 m/s、捡拾装置输送链线速度为 1.10 m/s、升运链线速度为 1.20 m/s、三级输送链线速度为 1.30 m/s 时,漏薯率和伤薯率分别为 2.96% 和 3.45%,整机总体工作性能最优。

为验证软件得出的最优参数的准确性,按以上条件进行田间试验,最终得出的结果与理论值对比如表 7 所示。

表 7 实测值与理论值对比

Tab.7 Comparison between measured and theoretical values

项目	漏薯率 Y_1	伤薯率 Y_2
实测值	2.82	3.61
理论值	2.96	3.45
相对误差	4.73	4.64

参考 DB64/T 1795—2021《马铃薯机械化捡拾技术规程》规定的漏薯率小于等于 5%、伤薯率小于等于 6%,最终验证试验表明该自走式马铃薯捡拾装袋机满足作业要求,且实测值与理论值的误差均小于 5%。

5 结论

(1)设计了一种自走式马铃薯捡拾装袋机,包括捡拾装置、升运链装置、三级输送链装置以及分拣台和卸料装置等关键部件。

(2)运用 DEM - MBD 耦合的方法对马铃薯在捡拾装置输送链和升运链输送链交接处的运动过程及受力情况进行了分析。

(3)使用 Design-Expert 10.0.1 软件分别以漏薯率、伤薯率为因变量,以整机前进速度、捡拾装置输送链线速度、升运链线速度和三级输送链线速度为自变量,得出二次多项式回归模型。对回归模型进行优化处理后,得到自走式马铃薯捡拾装袋机最佳工作参数为:整机前进速度 0.70 m/s、捡拾装置输送链线速度 1.10 m/s、升运链线速度 1.20 m/s、三级输送链线速度 1.30 m/s。

(4)使用最优参数进行田间试验,得出该自走式马铃薯捡拾装袋机漏薯率为 2.82%,伤薯率为 3.61%。满足马铃薯捡拾收获作业要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 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 Zhaoquo, 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)

[3] 魏忠彩,李洪文,苏国梁,等.缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机研制[J].农业工程学报,2019,35(8):1-11.

WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Development of potato harvester with buffer type potato-impurity separation sieve[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(8):1-11. (in Chinese)

[4] 肖伟中,高迎春,陈海需,等.小型马铃薯捡拾分级机的设计与试验[J].农机化研究,2019,41(12):130-134.

XIAO Weizhong, GAO Yingchun, CHEN Haixu, et al. Design and test of a small potato pickup and grading machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(12):130-134. (in Chinese)

[5] 杨金砖,李国民,刘兴博,等.4UJ-1400 马铃薯捡拾机的研制[J].农机使用与维修,2019(2):5-7.

[6] 时永,闫小丽,朱瑞祥,等.一种小型马铃薯捡拾机的研制与试验[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):287-291,298.

SHI Yong, YAN Xiaoli, ZHU Ruixiang, et al. Design and test of a small potato pickup machine[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016,34(4):287-291,298. (in Chinese)

[7] 胡乾坤,肖伟中.马铃薯捡拾分级一体化收获机的设计与试验[J].农机化研究,2021,43(11):110-114.

HU Qiankun, XIAO Weizhong. Design and test of potato pickup and grading machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(11):110-114. (in Chinese)

[8] WANG L, LIU F, WANG Q, et al. Design of a spring-finger potato picker and an experimental study of its picking performance [J]. Agriculture, 2023, 13(5):945.

[9] 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)

[10] 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)

[11] 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)

[12] 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 beet combine [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 1 – 9. (in Chinese)

[13] 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)

[14] 张兆国,王法安,张永成,等. 自走式三七收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):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)

[15] 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)

[16] 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)

[17] 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)

[18] 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)

[19] 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)

[20] 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)

[21] 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)

[22] 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)

[23] 鲍玉冬,杨闯,赵彦玲,等. 基于碰撞变形能的机械采收蓝莓果实碰撞损伤评估[J]. 农业工程学报,2017,33(16):283 – 292.
BAO Yudong, YANG Chuang, ZHAO Yanling, et al. Collision injury assessment of mechanical harvesting blueberry fruit based on collision deformation energy[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(16):283 – 292. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 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)