doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.008

基于 DEM - MBD 的变螺距式马铃薯分级装置设计与试验

李　卫[1,2]　赵文杰[1,3]　朱恒旭[1]　翟　亮[1]　贺　欣[4]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;2.陕西省农业装备工程技术研究中心,陕西杨凌 712100;
3.农业农村部保护性耕作(黄河流域)机械化科研基地,陕西杨凌 712100;4.比亚迪汽车股份有限公司,西安 710100)

摘要:为解决马铃薯分级装置结构较大、传动复杂、易伤薯问题,设计了一种变螺距式马铃薯滚筒分级装置,明确了其工作原理,通过对马铃薯在分级装置内的动力学和运动学分析确定了其关键结构参数。运用 RecurDyn 软件构建分级装置动力学模型,基于马铃薯的物理特性在 EDEM 中构建马铃薯模型,采用 EDEM - RecurDyn 耦合仿真模拟了分级装置实际工作过程中多构件间的运动、约束和接触。选择进薯量、分级滚筒转速和分级段长度为影响因素,以马铃薯分级准确率、分级效率作为评价指标进行性能验证,并基于上述因素进行单因素与二次正交仿真试验,确定分级装置的最优结构和运动参数。仿真试验结果表明,当进薯量为 3.68 kg/s、分级滚筒转速为 34.50 r/min、分级段长度为1 600 mm 时,所获得的分级准确率和分级效率最优,分别为 91.6% 和 3.0 kg/s。样机试验结果表明,在最优解参数下分级装置平均分级准确率大于 89%,平均分级效率大于 3.18 kg/s,伤薯率小于 1%,与仿真试验相对误差为 2.10%,说明仿真试验具有较高准确性且本文设计的分级装置工作性能较好,可以满足中小规模的马铃薯分级要求。

关键词:马铃薯;分级装置;变螺距式;耦合仿真;EDEM - RecurDyn

中图分类号:S226.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0094-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Variable Pitch Potato Grading Devices Based on DEM - MBD Coupling

LI Wei[1,2]　ZHAO Wenjie[1,3]　ZHU Hengxu[1]　ZHAI Liang[1]　HE Xin[4]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Shaanxi Engineering Technology Research Center for Agricultural Equipment*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *Scientific Research Base for Conservation Tillage Mechanization* (*Yellow River Basin*), *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
4. *Build Your Dreams Automobile Co.*, *Ltd.*, *Xi'an* 710100, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of potato grading device with large structure, complex transmission and susceptibility to damage potatoes, a variable pitch potato grading device was designed, and its working principle was expounded. The key structural parameters of the potato were determined by dynamic and kinematic analysis of the potato in the grading drum. The dynamic model of the grading device was constructed by using RecurDyn software. The potato model was constructed in EDEM based on the physical characteristics of potato. The EDEM - RecurDyn coupling simulation was used to simulate the movement, constraint and contact between multiple components in the actual working process of the grading device. The amount of potato, the rotation speed of the grading drum and the length of the grading section were selected as the influencing factors, and the potato grading accuracy and grading efficiency were used as the evaluation indexes to verify the performance. Based on the above factors, the single factor and quadratic orthogonal rotation regression combination simulation test was carried out to determine the optimal structure and motion parameters of the grading device. The simulation results showed that the amount of potato was 3.68 kg/s, the speed of the grading roller was 34.50 r/min, and the length of the grading section was 1 600 mm, the optimal values of the classification accuracy and classification efficiency obtained were 91.6% and 3.0 kg/s, respectively. The prototype test results showed that the average classification

收稿日期:2025-04-28　修回日期:2025-05-15

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2019BFF02003)和教育部人文社科项目(22YJA630042)

作者简介:李卫(1977—),男,副教授,博士,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail:liweizibo@nwafu.edu.cn

accuracy of the grading device was greater than 89% under the optimal solution parameters, the average classification efficiency was greater than 3.18 kg/s, and the potato injury rate was less than 1%. The relative error between the simulation test and the prototype test was 2.10%, indicating that the simulation test had high accuracy and the grading device designed had good working performance, which can meet the requirements of potato grading in small and medium-sized farms.

Key words: potato; grading device; variable pitch type; coupled simulation; EDEM－RecurDyn

0　引言

马铃薯是世界第四大粮食作物，中国作为马铃薯生产大国，无论栽培面积还是总产量都稳居世界首位[1-3]。然而我国马铃薯产业呈现大而不强的态势，缺乏国际市场竞争力，其原因在于我国马铃薯分级及深加工产业落后，无法发挥其高产量的优势。马铃薯收获后的分级质量、效率和级数将直接影响后续深加工，而分级设备是保证马铃薯正确分级的关键装置[4]。

针对马铃薯分级过程中存在分级效率低、伤薯率高的问题，专家学者进行了相关研究。例如通过设计间隙可调的活动转板、差动分级和多级拨辊推送等技术手段[5-9]，提升了马铃薯分级装置的精度、效率并降低马铃薯损伤。但目前我国马铃薯分级装置的理论研究还处于初级阶段，未能有效解决整体结构较大、传动复杂、稳定性差、伤薯率较高的问题。随着离散元法在马铃薯分选设备仿真方面的快速发展，运用离散元软件与有限元软件进行耦合仿真，可以更好地模拟农业机械实际工作过程中的复杂动力学，为农业机械设计提供理论基础[10-12]。

针对上述问题，本文结合对马铃薯物理特性的分析，设计一种小型变螺距式马铃薯滚筒分级装置，通过对马铃薯抛送、输送和分级过程的动力学和运动学分析，从理论上研究关键部件几何参数和运动参数。利用 EDEM 与 RecurDyn 双向耦合仿真技术[13-15]，分别采用 DEM 模块和 MBD 模块计算马铃薯颗粒动力学和分级装置系统动力学，确定分级装置进薯量、分级段长度和滚筒转速的最优参数组合，以期为提高马铃薯分级装置分级性能提供理论依据，有效解决分级装置结构较大、传动复杂、易伤薯的问题，同时满足马铃薯分级作业质量要求[16]。

1　整机结构与工作原理

1.1　马铃薯基本物理特性

采用宁夏回族自治区固原市广泛种植的“青薯 9 号”马铃薯为研究对象，随机选取 360 颗马铃薯对其质量及三轴尺寸进行测量，测量方法为外接矩形宽高比法，并通过碰撞损伤试验得到马铃薯单侧压缩临界损伤所能承受的力为 420.3～770.9 N[17]，对测量数据进行分析得到表 1 所示的马铃薯块茎特征参数。由表 1 可知马铃薯三轴尺寸及质量变异系数为 19.92%～65.33%，因此“青薯 9 号”马铃薯不同个体间长度、宽度、厚度和质量差异较大。

表 1　马铃薯块茎特征参数

Tab.1　Characteristic parameters of potato tubers

项目	参数			
	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	质量/g
最大值	169.43	93.48	67.14	482.1
最小值	24.67	21.43	22.95	12.3
平均值	84.14	56.05	44.89	143.37
标准差	26.03	12.66	8.94	93.67
变异系数/%	30.94	22.59	19.92	65.33

根据农业行业标准 NY/T 1006—2006《马铃薯等级规格》[18]，取质量小于 100 g 为小薯，质量大于 100 g 小于 300 g 为中薯，质量大于 300 g 为大薯，将马铃薯分为 3 级，但由于质量检测分级较为复杂，本文运用 Origin 软件得到如图 1 所示马铃薯质量和厚度拟合曲线，由图 1 可知，马铃薯厚度与质量之间的相关性较高，故将质量分级转换为厚度分级，并选取厚度小于 41 mm 为小薯，大于 41 mm 小于 60 mm 为中薯，大于 60 mm 为大薯。

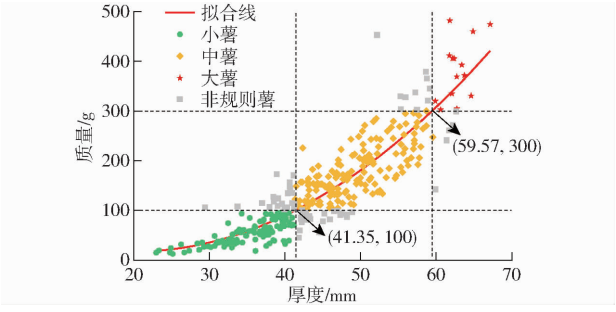


图 1　马铃薯质量与厚度拟合曲线

Fig.1　Fitting curve of potato quality and thickness

1.2　整机结构

变螺距式马铃薯滚筒分级装置由环形链条、链轮、电机、变螺距侧板、分级滚筒、大薯收集箱、支撑轮、中薯收集箱、变螺距辊、小薯收集箱和机架等结构构成，如图 2 所示，分级滚筒和机架之间通过支撑轮进行连接。整机尺寸为 2 400 mm × 800 mm × 1 200 mm，整机功率为 640 W，属于小型马铃薯分级装置。工作时，仅依靠一组链轮和环形链条进行传

动,解决了转板式、辊式分级装置传动复杂的问题,且链传动精度高,不会出现打滑现象。

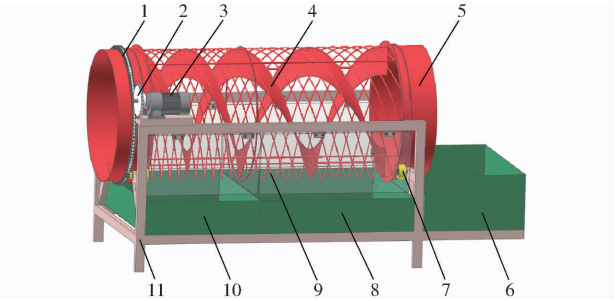


图 2 分级装置结构图

Fig. 2 Classification device structure diagram

1. 环形链条 2. 链轮 3. 电机 4. 变螺距侧板 5. 分级滚筒 6. 大薯收集箱 7. 支撑轮 8. 中薯收集箱 9. 变螺距辊 10. 小薯收集箱 11. 机架

1.3 工作原理

该马铃薯分级装置通过减速电机驱动,由链条和链轮构成传动系统带动滚筒低速旋转,马铃薯进入分级滚筒后在变螺距辊和变螺距侧板的推动下持续向后运动,当变螺距辊的螺距大于马铃薯厚度时,马铃薯掉入相应的收集箱,分级滚筒前半段的螺距较小,落下的是小薯,后半段的螺距较大,落下的是中薯,大薯继续向后运动,从分级滚筒后方出口落入大薯收集箱。分级过程中马铃薯采用非离心式的分级方式,在避免离心力对马铃薯产生损伤的同时增加了马铃薯在滚筒内的运动行程,实现了马铃薯低损高效分级。

2 分级滚筒结构设计与参数确定

2.1 分级滚筒设计

分级滚筒是马铃薯分级装置的核心部件,可将马铃薯按照厚度分为 3 个等级。影响分级滚筒分级效果的主要因素包含分级滚筒安装角度、分级滚筒直径 D、变螺距辊间隙 l、变螺距辊螺距 S、分级段长度 L 等结构参数,图 3 为分级滚筒关键结构参数示意图。

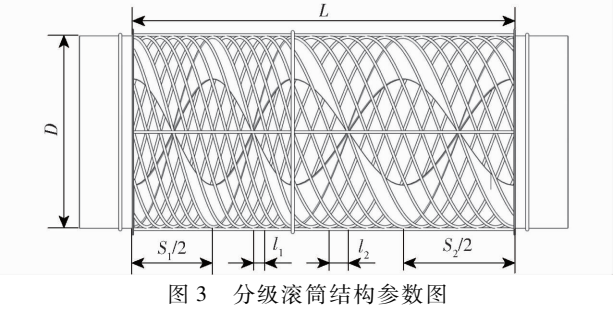


图 3 分级滚筒结构参数图

Fig. 3 Diagram of structural parameters of classification drum

为保证马铃薯分级效率,同时考虑分级滚筒链轮链条传动系统的布置、分级滚筒与机架的配合、分级滚筒同支撑轮之间的安装情况以及整体尺寸和质量等问题,分级滚筒选择水平安装,根据经验分级滚筒直径 D 取 700 mm,由马铃薯厚度取小薯分级段变螺距辊间隙 l_1 为 41 mm,中薯分级段变螺距辊间隙 l_2 为 60 mm。

2.1.1 变螺距辊螺距确定

变螺距辊螺距决定螺旋升角,进而影响马铃薯沿轴向与周向速度和分力,最终对马铃薯输送分选效率产生显著影响。根据传统螺距计算公式[19],结合分级滚筒结构图可得螺距计算公式为

$$S_1 = a_s(d + l_1) \tag{1}$$

$$S_2 = a_s(d + l_2) \tag{2}$$

式中 S_1——小薯分级段螺距,mm

S_2——中薯分级段螺距,mm

a_s——变螺距辊数量,个

d——变螺距辊直径,mm

综合考虑马铃薯分级过程,设计变螺距辊与套在其外部的橡胶圈整体直径为 8 mm,计算可得变螺距辊螺距 S 为 560 ~ 840 mm。取变螺距辊数量为 12 个,根据式(1)、(2),计算得小薯分级段螺距 S_1 为 590 mm,中薯分级段螺距 S_2 为 820 mm。

2.1.2 分级段长度确定

分级段长度通过影响马铃薯在滚筒内的运动时长进而影响分级效果,非离心式分级过程中马铃薯运动轨迹呈螺旋状,可保证在较短的分级段长度下马铃薯运动行程较长。

以单位时间进入分级装置的马铃薯体积计算确定分级段长度。根据田间测量数据,取分级装置单位时间内的进薯量 M 为 5.62 kg/s,忽略分级滚筒内马铃薯间空隙,单位时间内分级滚筒输送马铃薯体积 V_1 为

$$V_1 = Ax \tag{3}$$

其中

$$A = \frac{\theta}{\pi}[R^2 - (R - t)^2] \tag{4}$$

式中 A——分级滚筒内马铃薯横向面积,m^2

x——单位时间马铃薯在滚筒内的运动距离,m

t——马铃薯堆积厚度,m

R——分级滚筒半径,mm

θ——马铃薯在分级滚筒内分布角,(°)

分级滚筒转动一周时,取马铃薯螺旋上升角度为 $\Delta\theta$,因此单位时间内马铃薯在分级滚筒内的运动距离 x 为

$$x = \frac{L_1}{S_1}\frac{\sqrt{S_1^2 + 4\pi R^2}}{2\pi}\Delta\theta + \frac{L_2}{S_2}\frac{\sqrt{S_2^2 + 4\pi R^2}}{2\pi}\Delta\theta \tag{5}$$

式中 L_1——小薯分级段长度,mm

L_2——中薯分级段长度,mm

取分级滚筒转动一周马铃薯螺旋上升角度 $\Delta\theta=60°$，根据田间测量数据需分级的中薯数量约为小薯的 1.43 倍，因此中薯分级段长度应大于小薯分级段，取中薯分级段滚筒长度 L_2 为 1.4 倍的 L_1。

取单位时间内进入分级滚筒的马铃薯体积等于分级滚筒单位时间内输送马铃薯体积 V_1，结合式(1)～(5)，求解可得马铃薯在分级滚筒内的运动距离 x 为 868 mm，即分级滚筒需提供至少 868 mm 的长度才可使马铃薯均实现向后输送，因此分级段长度 L 应大于 868 mm。

2.2　马铃薯运动分析

2.2.1　马铃薯抛送过程分析

马铃薯在抛送过程中产生损伤的主要原因是马铃薯与分级装置前端发生碰撞，如图 4 所示，在此过程中产生的损伤情况主要与碰撞速度 v_m 有关，研究数据显示，降低分级装置的安装高度可以降低马铃薯跌落至分级装置的碰撞速度，进而有效降低马铃薯在抛送环节的机械损伤。综合考虑马铃薯损伤等问题，本文取输送装置相对于分级装置的安装高度为 230 mm。

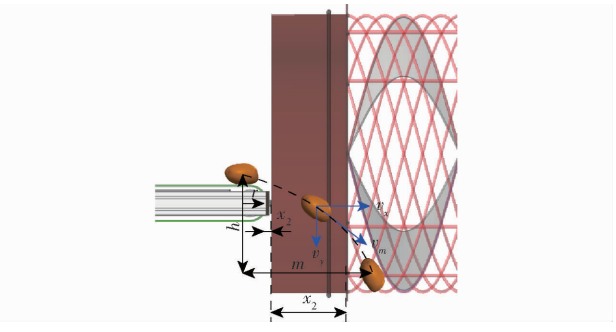


图 4　马铃薯抛送过程分析

Fig. 4　Force analysis of potato transportation process

2.2.2　马铃薯输送过程分析

马铃薯进入分级滚筒后在变螺距侧板的作用下向后输送，取距离变螺距侧板轴线 r 处的马铃薯作为研究对象，将单个马铃薯简化为质点，且假设马铃薯间不会产生相对滑移，其受力分析如图 5a 所示，运动图解如图 5b 所示。

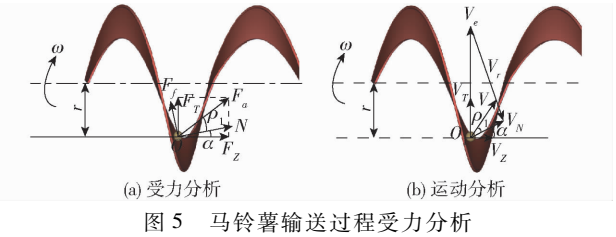


图 5　马铃薯输送过程受力分析

Fig. 5　Force analysis of potato transportation process

由图 5a 对变螺距侧板上马铃薯受力分析可得输送过程中马铃薯动力学方程为[20-21]

$$\begin{cases} F_Z = F_a\cos(\alpha+\rho_1) \\ F_T = F_a\sin(\alpha+\rho_1) \\ \alpha = \arctan(S/(2\pi R)) \\ \rho_1 = \arctan\mu_1 \end{cases} \tag{6}$$

式中　F_Z——马铃薯实际所受轴向力，N

F_T——马铃薯实际所受圆周力，N

F_a——马铃薯实际所受合力，N

α——变螺距侧板螺旋升角，(°)

ρ_1——马铃薯与变螺距侧板间的摩擦角，(°)

μ_1——马铃薯与变螺距侧板间动摩擦因数，取 0.269

要使分级过程中马铃薯沿轴向移动，则需保证马铃薯所受轴向推力大于轴向阻力，即

$$N\cos\alpha > F_f\sin\alpha \tag{7}$$

其中

$$F_f = \mu_1 N \tag{8}$$

式中　N——马铃薯在变螺距侧板受到的法向推力，N

F_f——马铃薯在变螺距侧板上受到的摩擦力，N

结合式(6)～(8)可知，要使马铃薯沿轴向移动，需保证变螺距侧板螺旋升角 $\alpha<74.9°$。

由图 5b 可得马铃薯输送过程运动学方程为

$$\begin{cases} V_Z = \dfrac{nS\cos\alpha}{60\cos\rho_1}\cos(\alpha+\rho_1) \\ V_T = \dfrac{nS\cos\alpha}{60\cos\rho_1}\sin(\alpha+\rho_1) \end{cases} \tag{9}$$

式中　V_Z——马铃薯实际轴向速度，m/s

V_T——马铃薯实际周向速度，m/s

n——马铃薯滚筒转速，r/min

由式(9)可知，分级滚筒转速 n 与马铃薯轴向速度 V_Z 和周向速度 V_T 呈正相关，因此分级滚筒转速对马铃薯分级效果具有较大影响。当分级滚筒转速大于临界转速时，马铃薯为离心式分级，这种方式对马铃薯损伤较大，因此采用非离心式马铃薯分级，非离心式分级方式下分级滚筒的转速 n 应小于其临界转速 n_1，查阅《农业机械手册》计算得分级滚筒转速应满足 $n\leqslant 51.04$ r/min。

2.2.3　马铃薯分级过程分析

进入分级滚筒后，马铃薯在变螺距侧板作用下沿轴向输送的过程中，从变螺距辊间隙掉落实现分级。为明确马铃薯在分级过程中的运动状况以及影响分级效果的因素，对分级过程中的马铃薯进行力学分析，如图 6 所示。

将马铃薯受力沿轴向和周向进行分解，得到

$$\begin{cases} F_x = N_{xy}\cos\alpha - F_s\sin\alpha \\ F_y = G - F_s\cos\alpha - N_{yz}\sin\beta - N_{xy}\sin\alpha \end{cases} \tag{10}$$

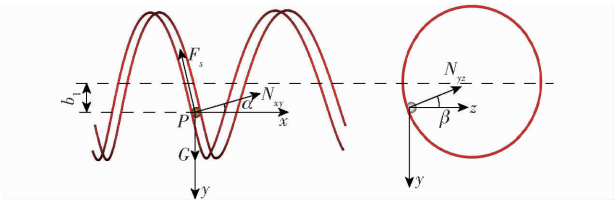


图 6 马铃薯分级过程受力分析

Fig. 6 Force analysis of potato grading process

式中 F_x——马铃薯在变螺距辊上受到的轴向力,N

F_y——马铃薯在变螺距辊上受到的周向力,N

N_{xy}——xy 平面变螺距辊对马铃薯的支持力,N

N_{yz}——yz 平面变螺距辊对马铃薯的支持力,N

G——马铃薯重力,N

F_s——马铃薯在变螺距辊上受到的摩擦力,N

在分级滚筒以较低的转速转动的情况下,马铃薯沿着变螺距辊上升一段行程后滑落至分级滚筒底部,在此过程中完成马铃薯分级。由式(10)可知,变螺距辊螺旋升角 α 越小越利于马铃薯沿轴向输送。

3 关键参数耦合仿真优化

3.1 仿真模型建立与约束添加

采用 Solidworks 软件按照比例 1∶1绘制分级装置三维模型,以 *.x-t 格式导入 RecurDyn 软件的前处理模块中[22],并通过 RecurDyn 软件 home 模块中的 merge 功能,合并小、中和大薯收集箱为集薯箱,合并机架和支撑轮轴为机架,合并变螺距辊、变螺距侧板、前套筒、后套筒、导轨圆环、横向支撑杆、横向支撑杆为分级滚筒,构建的分级装置动力学模型如图 7 所示。

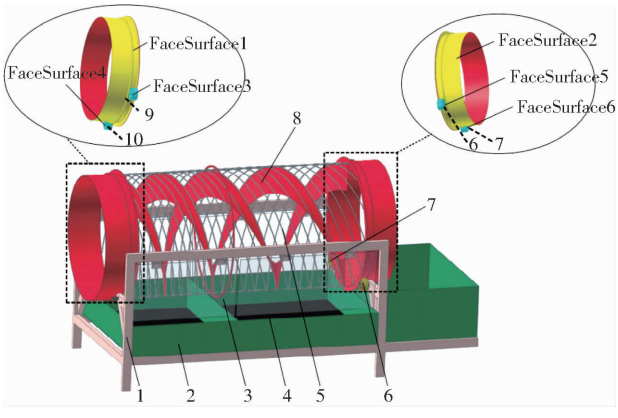


图 7 分级装置仿真模型

Fig. 7 Simulation model of grading device

1. 机架 2. 集薯箱 3. 侧挡板 4. 橡胶垫 5. 橡胶套 6. 支撑轮 1 7. 支撑轮 2 8. 分级滚筒 9. 支撑轮 3 10. 支撑轮 4

为使分级装置三维模型具有实际物理意义,设置橡胶板和橡胶套材料属性为橡胶(rubber),其余部件定义材料属性为钢(steel)。设置 steel 材料密度为 7 800 kg/m^3,泊松比为 0.28,剪切模量为 310 GPa,设置 rubber 材料密度为 1 800 kg/m^3,泊松比为 0.3,剪切模量为 0.038 GPa。在分级滚筒与支撑轮处添加转动副,并在分级滚筒的旋转副上定义速度驱动函数,同时按图 7 所示添加分级滚筒与支撑轮间的接触(FaceSurface1 ~6)。

3.2 离散元模型建立

3.2.1 马铃薯颗粒模型建立

为获得真实的马铃薯模型,进而提高仿真精度,选取各类型尺寸范围中最为接近尺寸平均值的马铃薯为特征薯,采用三维扫描仪 1∶1投射显示马铃薯真实模型,将扫描后的马铃薯三维模型在 EDEM 中完成非球形颗粒填充,得到如图 8 所示的马铃薯仿真模型。



图 8 马铃薯仿真模型

Fig. 8 Potato simulation model

3.2.2 分级装置离散元仿真模型

EDEM – RecurDyn 耦合仿真时,在 RecurDyn 中的 SPI 模块选择与马铃薯接触的分级滚筒、橡胶套、橡胶垫、侧挡板和集薯箱,将其创建为 EDEM 可以识别的 *.Wall 文件。接着将其导入至 EDEM 中,建立的分级装置离散元仿真模型如图 9 所示。

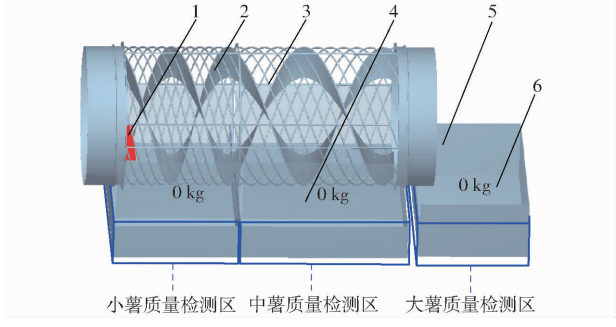


图 9 分级装置离散元仿真模型

Fig. 9 Discrete elemental simulation model of classification devices

1. 颗粒工厂 2. 分级滚筒 3. 橡胶套 4. 侧挡板 5. 集薯箱 6. 橡胶垫

3.2.3 参数设置

马铃薯在分级过程中会与分级装置及马铃薯发生接触碰撞,因此选用 Hertz – Mindlin(无滑动)接触模型进行仿真分析。参照文献[23 – 27],得到如表 2 所示的接触参数。

3.2.4 仿真过程

在分级装置变螺距辊前端上方设置马铃薯颗粒

表 2　离散元仿真参数

Tab. 2　Discrete element simulation parameters

项目	参数	数值
马铃薯	泊松比	0.500
	剪切模量/Pa	1.366×10^{6}
	密度/(kg·m^{-3})	1 048
马铃薯-马铃薯	恢复系数	0.790
	静摩擦因数	0.450
	滚动摩擦因数	0.024
马铃薯-橡胶管	恢复系数	0.710
	静摩擦因数	0.652
	滚动摩擦因数	0.303
马铃薯-分级滚筒	恢复系数	0.525
	静摩擦因数	0.445
	滚动摩擦因数	0.269

工厂，马铃薯颗粒按照实际马铃薯样本统计情况生成，并运用 EDEM 在各个集薯箱建立质量检测模块，马铃薯分级的耦合仿真过程如图 10 所示。

RecurDyn 软件可求解分级装置的工作速度和位置等动力学参数，并将其传递至 EDEM 软件中，EDEM 接收到信息后计算分级装置与马铃薯颗粒之间的相互作用情况，并将信息以质量力的形式传递至 RecurDyn 软件中，从而研究分级装置分级性能。

3.3　仿真试验

以进薯量、分级段长度、分级滚筒转速为试验因素，以分级准确率 y_1 和分级效率 y_2 为评价标准，进行单因素仿真试验与二次正交旋转回归组合仿真试验，探究分级装置结构和运动参数对分级性能的影响，进而确定分级装置的最优结构和运动参数。

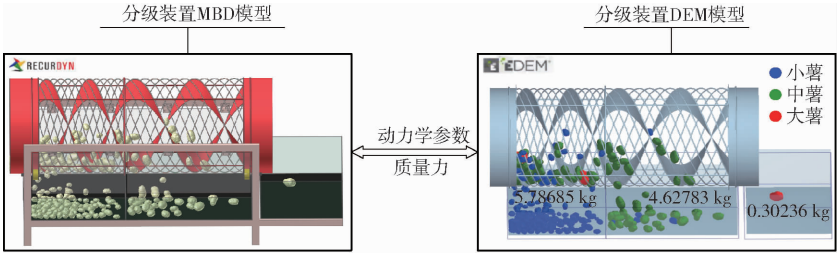


图 10　MBD－DEM 耦合仿真过程

Fig. 10　MBD－DEM coupling simulation process

3.3.1　仿真试验评价指标

选择马铃薯分级准确率 y_1、分级效率 y_2 作为分级装置性能的评价指标[20]，计算公式分别为

$$y_1=\frac{m_t}{M_1}\times100\% \tag{11}$$

$$y_2=\frac{M_2}{T} \tag{12}$$

式中　m_t——分选出的符合每级尺寸范围马铃薯总质量，kg

M_1——马铃薯生成总质量，kg

M_2——分选出的马铃薯总质量，kg

T——分选所需时间，s

3.3.2　单因素仿真试验

结合分级滚筒结构设计与理论分析，取分级装置进薯量为 1.87 ~ 5.62 kg/s，分级段长度为 1 000 ~ 1 800 mm，分级滚筒转速为 10 ~ 50 r/min 进行单因素仿真试验，因素编码如表 3 所示，为减小仿真试验的误差，每组试验重复 3 次并计算其平均值。

表 3　单因素试验编码

Tab. 3　Single factor test levels

编码	因素		
	进薯量 M/(kg·s^{-1})	滚筒转速 n/(r·min^{-1})	分级段长度 L/mm
1	1.87	10	1 000
2	2.91	20	1 200
3	3.75	30	1 400
4	4.69	40	1 600
5	5.62	50	1 800

试验时其余两试验因素设置为水平 3 所对应的数值，另一试验因素从水平 1 至 5 依次改变，通过仿真试验，得到 3 种因素对分级准确率和分级效率的单因素分析结果，如图 11 所示。

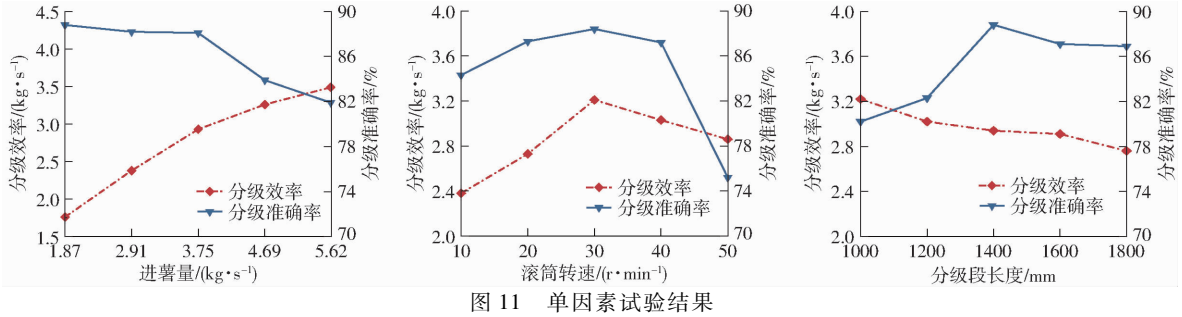


图 11　单因素试验结果

Fig. 11　Plots of one-way test results

3.3.3 二次正交试验

通过3次单因素试验,结合图11确定正交试验3种因素范围分别为:进薯量1.87~3.75 kg/s、分级滚动转速20~40 r/min、分级段长度1 200~1 600 mm。并采用Design-Expert 13.0软件设计Box-Behnken正交试验,试验因素的编码如表4所示,试验方案与结果如表5所示。

表4 试验因素编码

Tab.4 Experimental factors codes

编码	因素		
	进薯量 M/(kg·s^{-1})	滚筒转速 n/(r·min^{-1})	分级段长度 L/mm
-1	1.87	20	1 200
0	2.81	30	1 400
1	3.75	40	1 600

表5 Box-Behnken试验结果

Tab.5 Box-Behnken test results

序号	因素			分级准确率/%	分级效率/(kg·s^{-1})
	M/(kg·s^{-1})	n/(r·min^{-1})	L/mm		
1	1.87	20	1 400	86.7	1.34
2	3.75	20	1 400	82.3	1.94
3	1.87	40	1 400	88.3	1.42
4	3.75	40	1 400	88.5	2.96
5	1.87	30	1 200	91.9	1.78
6	3.75	30	1 200	86.9	2.92
7	1.87	30	1 600	92.1	1.38
8	3.75	30	1 600	91.1	2.90
9	2.81	20	1 200	84.1	2.41
10	2.81	40	1 200	89.6	2.68
11	2.81	20	1 600	87.5	2.03
12	2.81	40	1 600	90.3	2.41
13	2.81	30	1 400	91.7	2.12
14	2.81	30	1 400	90.6	2.43
15	2.81	30	1 400	90.8	2.23
16	2.81	30	1 400	91.8	2.36
17	2.81	30	1 400	92.8	2.35

采用Design-Expert 13.0软件对试验结果进行多元回归拟合,剔除对试验结果影响不显著的因素,建立分级准确率y_1、分级效率y_2与进薯量M、滚筒转速n、分级段长度L之间的回归方程为

$$y_1 = 67.646\,57 - 4.699M + 2.166n - 0.009\,6L + 0.122\,34Mn + 0.005\,32ML - 1.393\,4M^2 - 0.038\,5n^2 \quad (13)$$

$$y_2 = 9.617 + 1.544M + 0.025\,3n - 0.015\,2L + 0.025Mn - 0.294\,5M^2 - 0.001\,23n^2 + 0.000\,005\,2L^2 \quad (14)$$

使用Design-Expert 13.0对分级准确率和分级效率进行方差分析,结果如表6所示。综合分析得知,分级准确率模型$F=29.92$,表明该模型显著;$P<0.05$表示模型项显著。分级效率模型$F=25.78$,表明该模型显著;$P<0.05$表示模型项显著。由方差分析可知,模型Mn、ML对试验指标分级准确率y_1具有显著交互作用,模型Mn对试验指标分级效率y_2具有显著交互作用,分别绘制其响应曲面,如图12所示。

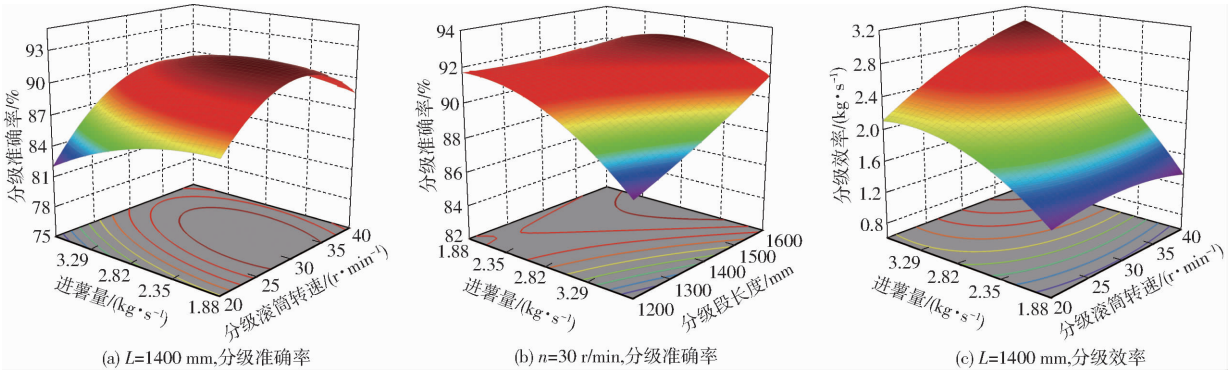
表6 分级准确率和分级效率方差分析结果

Tab.6 Classification accuracy and classification efficiency analysis of variance results

项目	变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
分级准确率	模型	136.94	9	15.22	29.92	<0.000 1
	残差	3.56	7	0.508 5		
	失拟差	0.447 5	3	0.149 2	0.191 7	0.897 0
	误差	3.11	4	0.778 0		
	总和	140.50	16			
分级效率	模型	4.18	9	0.464 0	25.78	0.000 1
	残差	0.126 0	7	0.018 0		
	失拟差	0.065 7	3	0.021 9	1.45	0.353 0
	误差	0.063 0	4	0.015 1		
	总和	4.30	16			

注:模型极显著($P<0.01$);模型显著($0.01\leqslant P<0.05$);模型较显著($0.05\leqslant P<0.1$)。

由图12a可知,当分级滚筒分级段长度为1 400 mm时,随着分级滚筒转速的增大分级准确率



(a) L=1400 mm,分级准确率 (b) n=30 r/min,分级准确率 (c) L=1400 mm,分级效率

图12 因素交互作用响应曲面

Fig.12 Interaction response surfaces

呈现先增大后减小的趋势，原因是转速较高时，马铃薯分级时间变短。随着进薯量的增大分级准确率呈递减趋势，原因是转速较低时过多的马铃薯超出了分级滚筒的分级能力。

由图 12b 可得，当分级滚筒转速为 30 r/min 时，随着分级滚筒分级段长度的增长分级准确率逐渐增大，随着进薯量的增多分级准确率逐渐减小，其原因是马铃薯在滚筒内产生堆积，在未被分级的情况下输送至后方。

由图 12c 可得，当分级滚筒分级段长度为 1 400 mm 时，随着进薯量的增大分级效率逐渐增大，但增大的趋势逐渐降低，随着分级滚筒转速的增大分级效率的增大趋势逐渐趋于平缓，原因是虽然转速增大能提高分级效率，但马铃薯总量不变，分级效率变化较小。

为进一步得到分级装置试验因素的最佳组合，采用 Design-Expert 13.0 软件进行参数优化，采取多目标优化方法，取分级准确率和分级效率最大值为目标，其优化约束条件和目标函数为

$$\begin{cases} \max\ y_1(M,n,L) \\ \max\ y_2(M,n,L) \\ \text{s.t.}\begin{cases} 1.87\ \text{kg/s} \leqslant M \leqslant 3.75\ \text{kg/s} \\ 20\ \text{r/min} \leqslant n \leqslant 30\ \text{r/min} \\ 1\,200\ \text{mm} \leqslant L \leqslant 1\,600\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \tag{15}$$

采用 Design-Expert 13.0 软件对 3 个因素最优解进行优化分析，得到优化结果为：当进薯量 3.68 kg/s、分级滚筒转速 34.50 r/min、分级段长度 1 600 mm 时，得到变螺距式马铃薯滚筒分级装置分级准确率和分级效率最优值分别为 91.6% 和 3.0 kg/s。

3.4　马铃薯受力和运动分析

3.4.1　马铃薯轴向力和轴向速度分析

分级滚筒内马铃薯轴向力和轴向速度的大小体现马铃薯在分级滚筒内的运动情况，通过在分级滚筒处添加监测器，并在最优参数条件下得到马铃薯轴向力和轴向速度平均值，结果如图 13 所示。由图 13 可知，在 8 s 后马铃薯轴向力和轴向速度较稳定，表明马铃薯可在变螺距侧板作用下沿轴向向后输送。

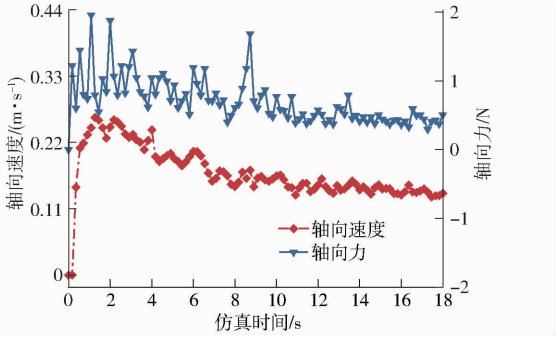


图 13　轴向力和轴向速度变化曲线

Fig. 13　Axial force and axial velocity change curve

3.4.2　马铃薯运动轨迹分析

通过对马铃薯在分级滚筒内的运动轨迹进行分析得到如图 14 所示的马铃薯运动轨迹图。从图 14 可以看出，马铃薯在分级滚筒内以非离心方式分级，整个分级过程中马铃薯的运动轨迹呈现为在轴向沿着变螺距辊和变螺距侧板向上输送一段距离后滑落至分级滚筒底部；马铃薯在整个分级过程受力最大值为 28.5 N。与马铃薯单侧压缩临界损伤所能承受的最大力 420.3～770.9 N 差距很大，因此马铃薯分级装置在作业时不会对马铃薯产生较大损伤。

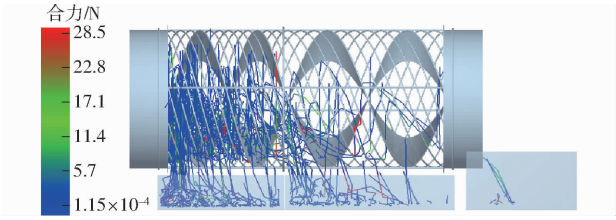


图 14　马铃薯运动轨迹图

Fig. 14　Potato movement trajectory

4　验证试验

4.1　试验材料

变螺距式马铃薯滚筒分级装置实物如图 15 所示，试验于西北农林科技大学机械与电子工程学院农业机械化实验室中进行。试验期间使用“荷兰 15”品种马铃薯，采用 2 批马铃薯样品进行独立试验，每批样品重复进行 3 次。试验前使用数显游标卡尺和电子秤测量并记录马铃薯样本的三轴尺寸和质量，将马铃薯分为小薯、中薯和大薯 3 个级别。

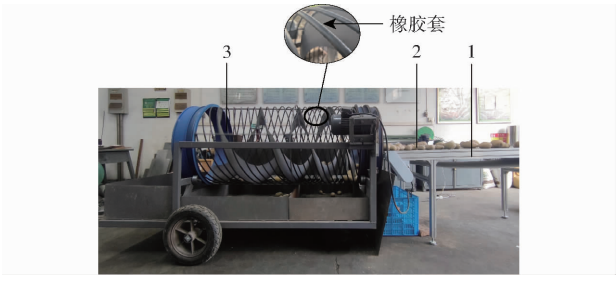


图 15　分级装置实物图

Fig. 15　Physical object of grading device

1. 输送装置　2. 马铃薯　3. 分级装置

4.2　试验方法

以仿真试验确定最佳参数：进薯量 3.68 kg/s、分级滚筒转速 34.50 r/min 和分级段长度 1 600 mm 进行样机试验。查阅资料，荷兰 15 马铃薯产量为 30 000～45 000 kg/hm^2，中小型马铃薯收获机工作

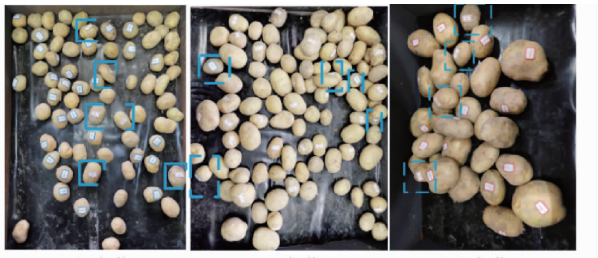
效率为 0.15 ~ 0.30 hm^2/h，即马铃薯收获量为 1.875 ~ 3.75 kg/s，进薯量 3.68 kg/s 可以有效满足马铃薯分级要求。为进一步确定分级装置分级性能，参考 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》和文献[28 -29]，试验评价指标除分级准确率 y_1 和分级效率 y_2 外，增设伤薯率 y_3，y_3 计算公式为

$$y_3 = \frac{M_3}{M_1} \times 100\% \tag{16}$$

式中 M_3——损伤马铃薯总质量，kg

4.3 试验结果

依据上述试验材料和试验方法对马铃薯分级装置的分级性能进行试验验证，最终分级结果如图 16 所示，图中框选为错误分级的马铃薯。导致分级错误的原因是部分马铃薯形状不规则，其厚度与质量之间的相关性较小。



(a) 小薯 (b) 中薯 (c) 大薯

图 16 马铃薯分级效果

Fig. 16 Potato grading effect

4.3.1 分级准确率

分级准确率作为衡量分级装置分级质量的关键参数，其分级准确率应不低于 85%，对试验后的马铃薯分级情况进行统计计算，可得试验分级准确率如表 7 所示。

表 7 分级准确率统计结果

Tab. 7 Classification accuracy statistical results

序号	质量/kg				分级准确率/%
	总计	小薯	中薯	大薯	
试验 1	50.96	12.90	23.34	8.95	89.03
试验 2	53.72	9.17	28.65	10.73	90.40

由表 7 可知，2 批马铃薯样品 3 次重复试验中，分级装置平均分级准确率分别为 89.03% 和 90.40%，试验结果差异不大，分级准确率均大于 89%，满足分级装置的分级性能要求。对比仿真试验可知两者相对误差为 2.1%，产生误差的原因是仿真中马铃薯形态尺寸较为理想，故分级效果会更好，分级准确率更高。

4.3.2 分级效率

分级效率表征分级设备在单位时间内的马铃薯处理能力，分级效率应越大越好，对试验后分级情况进行统计计算，可得试验分级效率如表 8 所示。

表 8 分级效率统计结果

Tab. 8 Classification efficiency statistics results

序号	总质量/kg	时间/s	分级效率/($kg \cdot s^{-1}$)
试验 1	50.96	16.03	3.18
试验 2	53.72	16.84	3.19

由表 8 可知，2 批马铃薯样品的 3 次重复试验中，试验分级装置平均分级效率分别为 3.18 kg/s 和 3.19 kg/s，试验结果差异不大，均满足分级装置的分级性能要求。对比仿真试验结果可知，两者间相对误差为 5.81%，两者之间产生误差的原因在于：实际试验中各马铃薯质量均不同，无法控制马铃薯的进薯量完全按照设定值输送至分级装置。

4.3.3 伤薯率

分选设备作业时会对马铃薯造成碰撞、挤压、摩擦等物理损伤，而受损往往会导致马铃薯保质时间缩减，造成经济价值下降等不利影响，因此伤薯率成为评价马铃薯分级装置性能的重要指标，对试验后马铃薯分级情况进行统计计算，可得伤薯率结果如表 9 所示。

表 9 伤薯率统计结果

Tab. 9 Statistical results of potato injury rate

序号	质量/kg				伤薯率/%
	总计	小薯	中薯	大薯	
试验 1	50.96	0.05	0.17	0.36	1.13
试验 2	53.72	0.02	0.27	0.34	1.18

由表 9 可知，2 批马铃薯样品的 3 次重复试验中，试验分级装置的平均伤薯率分别为 1.13% 和 1.18%，而在第 1 次试验中伤薯率分别为 0 和 0.2%，在实际分级作业时，马铃薯仅需经过一次分级作业即可满足分级要求，因此本研究认为马铃薯在实际分级作业中伤薯率小于 1%，马铃薯分级作业基本不会对马铃薯造成损伤。

根据 2 批马铃薯样品的独立试验结果可知，在不同的马铃薯样本条件下，分级装置分级准确率、分级效率和伤薯率差异均较小，与仿真试验误差也较小，表明仿真试验具有较好的准确性，因此设计的变螺距式马铃薯分级装置对马铃薯的适用性较好。

5 结论

(1) 以马铃薯物理特性分析和 EDEM - RecurDyn 耦合仿真为基础，设计了一种适用于中小种植规模的变螺距式马铃薯滚筒分级装置，确定了马铃薯按厚度分为小、中、大 3 个等级，解决了马铃薯分级装置结构较大、传动复杂、伤薯率高的问题。

（2）采用 EDEM 与 RecurDyn 双向耦合仿真的方法模拟分级装置真实工作情况，以分级准确率、分级效率和伤薯率为评价标准，选取进薯量、分级段长度和分级滚筒转速为关键因素，通过单因素与二次正交仿真试验，系统分析了分级装置结构和运动参数对分级性能的影响。采用 Design-Expert 软件对分级装置结构和运动参数进行优化，得到最优参数组合：进薯量为 3.68 kg/s、分级滚筒转速为 34.50 r/min 和分级段长度为 1 600 mm，该参数条件下分级准确率和分级效率分别为 91.6% 和 3.0 kg/s。

（3）完成了分级装置的加工制造和关键部件调试，并在最优参数条件下以分级效率、分级准确率和伤薯率为评价指标进行了样机试验。试验结果表明，分级装置平均分级准确率大于 89%，平均分级效率大于 3.18 kg/s，平均伤薯率小于 1%，与国内其他马铃薯分级装置的分级准确率基本相当，但伤薯率显著降低，且高于 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》中各项性能指标的要求；结合中小规模马铃薯生产的产量来看，装置的分级效率满足其分级效率需求。

参　考　文　献

[1] FAN J, LI Y, LUO W, et al. An experimental study of stem transported-posture adjustment mechanism in potato harvesting [J]. Agronomy Journal, 2023, 13(1): 234.

[2] 罗其友, 伦闰琪, 高明杰, 等. 2021—2025 年我国马铃薯产业高质量发展战略路径[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(3): 37－45.
LUO Qiyou, LUN Runqi, GAO Mingjie, et al. The strategic path of high-quality development of China's potato industry from 2021 to 2025[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(3): 37－45. (in Chinese)

[3] 李文华, 吕典秋, 闵凡祥. 中国、荷兰和比利时马铃薯生产概况对比分析[J]. 中国马铃薯, 2018, 32(1): 54－60.
LI Wenhua, LÜ Dianqiu, MIN Fanxiang. Comparative analysis of potato production profiles in China, the Netherlands and Belgium [J]. Chinese Potato Journal, 2018, 32(1): 54－60. (in Chinese)

[4] RADY A M, GUYER D E J C, AGRICULTURE E I. Rapid and/or nondestructive quality evaluation methods for potatoes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015,117(9):31－48.

[5] 赵浩浩. 活动转板式马铃薯分级-装袋装置优化设计与试验研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学, 2024.
ZHAO Haohao. Optimized design and experimental study of the movable rotating type grading-bagging device for potato[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[6] 刘兴. 马铃薯输送分级装置设计与试验研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2022.
LIU Xing. Design and experimental research on potato conveying and grading device[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[7] 王兴欢, 魏忠彩, 苏国梁, 等. 马铃薯收获机扰动分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 101－112.
WANG Xinghuan, WEI Zhongcai, SU Guoliang, et al. Design and experiment of simple harmonic disturbance separation device for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 101－112. (in Chinese)

[8] 吕金庆, 于佳钰, 冯雪, 等. 辊式马铃薯分级机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 323－332.
LÜ Jinqing, YU Jiayu, FENG Xue, et al. Design and experiment of roller potato grading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 323－332. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 章启祥. 基于离散元的马铃薯碰撞问题分析与分选机关键部件研发[D]. 淄博：山东理工大学, 2022.
ZHANG Qixiang. Analysis of potato collision problem and research and development of key components of separator based on discrete element[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022. (in Chinese)

[11] 王法安, 曹钦洲, 李彦彬, 等. 丘陵山区自走式马铃薯联合收获机设计与通过性试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2):10－19.
WANG Fa'an, CAO Qinzhou, LI Yanbin, et al. Design and trafficability experiment of self-propelled potato harvester in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.2): 10－19. (in Chinese)

[12] 汪昕, 杨德秋, 刘萌萌, 等. 自走式马铃薯捡拾机捡拾装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 20－29.
WANG Xin, YANG Deqiu, LIU Mengmeng, et al. Parameter optimization and experiment of picking device of selfpropelled potato collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp.2):20－29. (in Chinese)

[13] 纪龙龙, 谢焕雄, 杨红光, 等. 基于 EDEM_Recurdyn 耦合的马铃薯干式清土装置仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 109－115.

JI Longlong, XIE Huanxiong, YANG Hongguang, et al. Simulation analysis of potato dry soil cleaning device based on EDEM_Recurdyn coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 109 – 115. (in Chinese)

[14] 张红梅, 张晨明, 李志杰, 等. 基于 EDEM – RecurDyn 的玉米指夹式排种器振动特性分析与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 36 – 46.
ZHANG Hongmei, ZHANG Chenming, LI Zhijie, et al. Simulation analysis and optimization of vibration characteristics of corn finger clip seeding device based on EDEM – RecurDyn coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 36 – 46. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 高盛博. 尼龙刷辊式马铃薯清选分级机的设计及分级试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
GAO Shengbo. Design and grading test of nylon brush-roller potato cleaning and grading machine[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[17] 冯斌. 收获期马铃薯块茎物理特性及损伤机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
FENG Bin. Study on physical characteristics and damage of potato tubers at harvesting stage[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[18] 中华人民共和国农业部. NY/T 1066—2006 马铃薯等级规格[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.

[19] 郑欣欣. 倾斜式螺旋输送机输送性能及螺旋体有限元仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
ZHENG Xinxin. Research on the conveying performance of inclined screw conveyor and finite element analysis of screw body[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024. (in Chinese)

[20] 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)

[21] 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)

[22] 宋朋, 吕金庆. 基于 EDEM – RecurDyn 的自激式振动深松铲耦合仿真研究[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(2): 87 – 94.
SONG Peng, LÜ Jinqing. Effects of coupling simulation of self-excited vibratory subsoiler based on EDEM – RecurDyn[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(2): 87 – 94. (in Chinese)

[23] 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)

[24] 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)

[25] 刘文政, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125 – 135, 142.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125 – 135, 142. (in Chinese)

[26] 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)

[27] 程子文, 杨德秋, 刘萌萌, 等. 基于离散元仿真的马铃薯收获机集薯装袋过程研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 2): 62 – 74.
CHENG Ziwen, YANG Deqiu, LIU Mengmeng, et al. Bagging process of potato harvester based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 62 – 74. (in Chinese)

[28] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[29] 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): 8 – 17.
WANG Xiangyou, LÜ Danyang, REN Jiayi, et al. Design and parameter optimization of the cleaning device for a bagged potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(Supp.): 8 – 17. (in Chinese)