

马铃薯联合收获机环形减损集薯升运装置设计与试验

李学强^{1,2} 王兴欢³ 刘洋¹ 王法明^{1,2} 孟鹏祥^{1,2} 王金梅^{1,2}

(1. 山东思代尔农业装备有限公司, 德州 253600; 2. 山东省马铃薯生产装备智能化工程技术研究中心, 德州 253600;
3. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255091)

摘要: 针对现有马铃薯联合收获机升运输送行程长而导致伤薯率高、破皮率高、机具结构不紧凑等问题, 结合北方马铃薯主产区收获模式, 设计了一款适用于马铃薯升运作业的环形减损集薯升运装置。在阐述总体结构及工作原理基础上, 结合马铃薯运动学模型和碰撞特性分析, 得到影响升运效率和薯块损伤的主要因素, 通过 DEM - MBD 耦合构建薯块和装置模型, 得到最优参数组合: 升运挡板高度为 199.21 mm、升运挡板与升运输送带间夹角为 75.86°、相邻两升运挡板间距为 240.35 mm。台架试验表明: 上料量为 24 t/h, 升运输送带运行速度为 0.8、1.0、1.2 m/s 时, 电子马铃薯采集的碰撞加速度峰值平均值为 636.63、593.29、685.63 m/s², 破皮率为 1.13%、1.06%、1.21%, 碰撞加速度峰值均小于马铃薯临界损伤阈值。田间试验表明: 作业速度为 0.6、0.7、0.8 m/s 时, 伤薯率为 0.94%、1.06%、1.12%, 破皮率为 1.09%、1.21%、1.33%, 环形减损集薯升运装置运行正常, 未出现薯块掉落等现象, 各部件配合协调, 满足装袋型马铃薯联合收获机高效稳定的作业要求。

关键词: 马铃薯联合收获机; 清土除杂装置; 集薯升运装置; 耦合仿真; 结构优化

中图分类号: S225.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)12-0109-12

OSID:



Design and Experiment of Circular Reducing and Collecting
Potato Lifting Device for Potato Combine Harvester

LI Xueqiang^{1,2} WANG Xinghuan³ LIU Yang¹ WANG Faming^{1,2} MENG Pengxiang^{1,2} WANG Jinmei^{1,2}

(1. Shandong Star Agricultural Equipment Co., Ltd., Dezhou 253600, China

2. Shandong Provincial Intelligent Engineering and Technology Research Center for
Potato Production Equipment, Dezhou 253600, China

3. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China)

Abstract: In response to the problems of high potato damage rate, high peeling rate, long transportation distance, and large volume of existing potato combine harvesters, combined with the harvesting mode in the main potato production areas of northern China, circular loss reducing and collecting potato lifting device suitable for potato lifting operations was designed based on bagging potato combine harvesters. On the basis of expounding the overall structure and working principle, combined with the analysis of potato kinematics model and impact characteristics, it was found that the main factors affecting the lifting efficiency and potato damage of the device were the height of the lifting baffle, the angle between the lifting baffle and the lifting belt, the distance between two adjacent lifting baffles, and the running speed of the lifting belt, a simulation model of potato and circular loss reducing and collecting potato lifting device was constructed through DEM - MBD coupling, and single factor and multi factor experiments were conducted on the influencing factors. The optimal parameter combination for the circular loss reducing and collecting potato lifting device was obtained through parameter optimization: the height of the lifting baffle was 199.21 mm, the angle between the lifting baffle and the lifting belt was 75.86°, and the distance between adjacent lifting baffles was 240.35 mm. The results of the inter bench test showed that when the loading rate was 24 t/h and the conveyor belt speed was 0.8 m/s, 1.0 m/s and 1.2 m/s, the average values of the five collision acceleration peaks collected by the electronic potato were 636.63 m/s²,

收稿日期: 2023-08-01 修回日期: 2023-09-19

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2021TSGC1332)

作者简介: 李学强(1972—),男,高级工程师,主要从事马铃薯生产全程机械化与智能化技术研究, E-mail: lxqllsd@163.com

通信作者: 王法明(1991—),男,高级工程师,主要从事马铃薯生产全程机械化与智能化技术研究, E-mail: wangfaming2014@163.com

593.29 m/s², 685.63 m/s², with skin breaking rates of 1.13%, 1.06%, 1.21%, respectively. The collision acceleration peaks were all smaller than the critical damage threshold of the potato. Field experiments showed that at operating speeds of 0.6 m/s, 0.7 m/s and 0.8 m/s, the potato damage rates were 0.94%, 1.06% and 1.12%, and the skin breaking rates were 1.09%, 1.21% and 1.33%, respectively, the circular loss reducing and collecting potato lifting device operated normally without any phenomenon of potatoes falling. The coordination of various components ensured that the bagging type potato combine harvester was in an efficient and stable operating state.

Key words: potato combine harvester; soil cleaning and impurity removal device; potato collection and transportation device; coupling simulation; structural optimization

0 引言

随着中国农业产业的结构调整和马铃薯主粮化战略的实施^[1],马铃薯产业快速发展,但国内各种植区的地理特点和土壤特性存在一定差异,使得收获装备向多元化发展^[2-5]。目前,国内仍以人工收获或分段式收获为主,但东北和华北一季作区地势平坦、地块大,人工收获和分段式收获后的薯块捡拾耗费大量人力,且分段式收获后铺放在地面的薯块会出现被土壤和其他杂物二次覆盖情况,影响作业效率和收获品质^[6-7]。因此研发高效率收获的马铃薯联合收获机很有必要。

随着马铃薯种植业的快速发展,多种高效率的马铃薯联合收获机被研发应用^[8-12]。联合收获机械作业虽然大幅减少了人工劳动力,但对石块、土块和秧蔓等杂质的清选分离却难以达到人工捡拾的效果,为提高收获后马铃薯的洁净率,安装在联合收获机上的分离清选装置种类多样,形式复杂,从而增加了马铃薯的清选和输送行程,导致马铃薯所受的碰撞频率和损伤机率增加^[13-15]。马铃薯联合收获机为实现薯块的升运装车功能或者缓存集薯装袋功能,需将薯块输送至较高部位,采用传统的杆条输送需要较长的输送路线,增加了薯块的输送行程,薯块碰撞损伤几率增大,同时较长的输送路线增大了马铃薯收获机的体积,不利于在狭小的空间收获作业。因此,在保证马铃薯较高洁净率和较低伤薯率的同时,在有限的空间内实现马铃薯集薯升运尤为重要。

国外对马铃薯联合收获机的研发起步较早,马铃薯升运输送装置的种类也较多^[16-19]。德国 Grimme Varitron 系列自走式马铃薯联合收获机针对薯块升运集薯缓存问题,采用杆条框架+柔性布式环形升运输送方式,在满足薯块升运要求的同时降低了马铃薯的回流和碰撞损伤,且该系列马铃薯联合收获机采用自适应高度集薯箱技术,可将升运的薯块进行缓存,实现不间断作业,提高了整体收获效率^[20-21];比利时 Dewulf 公司生产的 Kwatro 系列自走式联合收获机采用杆条+挡板式环形升运输送方

式,既满足了薯块升运功能,又实现了对薯块的清土除杂,且挡板采用橡胶材料,可降低薯块与挡板间的碰撞冲击,实现低损伤升运^[21];日本东洋株式会社生产的 TPH8N 型牵引式马铃薯收获机采用环形升运方式,缩小了收获机的整体体积,且以一定间距纵向排列的环形绳可对薯块中的杂物再次清选,降低收获机的含杂率^[21]。

国内的企业和学者为解决薯块升运、缓存和装车问题也取得了一定的研究成果,希森天成 4ULZ-170 型马铃薯联合收获机采用多段可折叠式提升臂进行装车,该装置利用柔性布的特性降低薯块的碰撞冲击,可自动调整落薯距离,减少薯块间的碰撞损伤,实现低损装车^[20];中机美诺 1710A 型马铃薯收获机采用四级折叠提升臂装置,可满足不同工况要求,且配有自动提升臂输送装车集薯装置,满足多工况低损装车^[6];杨然兵等^[22]设计了一种立式环形分离输送装置,在满足清土除杂和集薯升运的同时提高了整体空间的利用率。

本文基于马铃薯农艺收获特点,设计一款对马铃薯进行垂直升运输送的环形减损集薯升运装置,为装袋型马铃薯收获机的结构优化提供参考。

1 整机结构与工作原理

环形减损集薯升运装置安装于装袋型马铃薯联合收获机上,该马铃薯收获机主要包括切土挖掘装置、薯土分离装置、清选装置、环形减损集薯升运装置、装袋卸袋平台、卸料输送装置、人工分拣平台和集薯缓存箱,如图 1 所示。

装袋型马铃薯联合收获机作业流程为:薯块挖掘、初次清土输送、二次清土除杂、集薯升运、人工分拣杂物、卸料输送、薯块装袋卸袋,作业流程简图如图 2 所示。

马铃薯联合收获机作业时,挖掘铲将挖掘的薯杂混合物输送至分离筛,分离筛对薯杂混合物进行透筛分离,分离后的薯块被输送至清选装置,清选装置对薯块表面粘有的泥土进行摩擦清除,环形减损集薯升运装置将清选后的薯块输送至分拣筛,工人

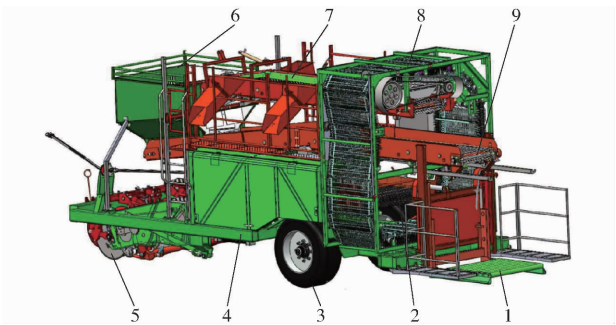


图 1 装袋型马铃薯联合收获机结构简图
Fig.1 Structure diagram of bagging type potato combine harvester

1. 装袋卸袋平台 2. 清选装置 3. 地轮 4. 收获机机架 5. 切土挖掘装置 6. 集薯缓存箱 7. 分拣筛 8. 环形减损集薯升运装置 9. 卸料输送带

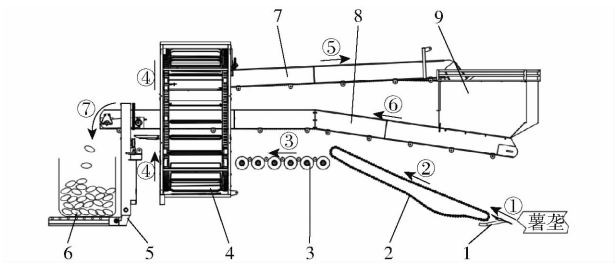


图 2 装袋型马铃薯联合收获机作业流程图
Fig.2 Schematic of operation process of bagging type potato combine harvester

1. 切土挖掘装置 2. 分离筛 3. 清选装置 4. 环形减损集薯升运装置 5. 装袋卸袋平台 6. 马铃薯 7. 分拣筛 8. 卸料输送带 9. 集薯缓存箱

将掺杂在薯块间的石块、秧蔓等杂物进一步选除,清选后的马铃薯被输送至集薯缓存箱,进行装袋时,卸料输送带将集薯缓存箱内的马铃薯输送至装袋卸袋平台,进行装袋卸袋,装满后的储薯袋由装袋卸袋平台卸至田间,完成联合收获作业^[23]。

2 环形减损集薯升运装置设计与分析

环形减损集薯升运装置是装袋型马铃薯联合收获机的关键部件,主要由机架、限位胶轮、挡料边齿、升运挡板、升运输送带、升运驱动轮、托运驱动轮和托运输送筛等构成,如图 3 所示。

环形减损集薯升运装置通过机架安装在清选装置后方,将清选装置输送的薯块进行清选和升运输送;限位胶轮将升运输送带和托运输送筛有序固定于机架内侧,限定两输送带所处位置和运行轨迹,同时调节输送带松紧度,防止输送带在运行过程中发生“丢转”、“跑偏”等情况;升运和托运驱动轮均通过轮齿与输送带带齿啮合为输送带传递动力。

收获作业时,拖拉机将动力通过液压泵传递至液压马达,液压马达驱动升运输送带和托运输送筛

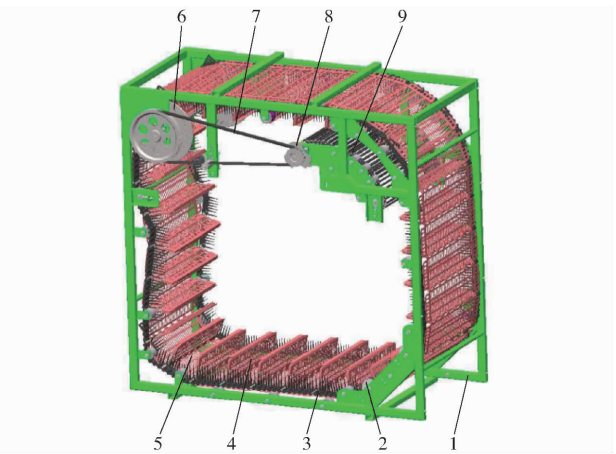


图 3 环形减损集薯升运装置结构简图
Fig.3 Structure diagram of annular potato lifting device
1. 机架 2. 限位胶轮 3. 挡料边齿 4. 升运挡板 5. 升运输送带 6. 升运驱动轮 7. 传动带 8. 托运驱动轮 9. 托运输送筛

逆时针运转,薯块被清选装置除杂后,抛落至相邻两升运挡板与升运输送带组成的凹型槽内,由环形减损集薯升运装置对薯块进行升运输送,当薯块被输送至“由水平输送方向向垂直输送方向过渡”的转角时(即第一转角),在凹型槽内的薯块由升运输送带托运输送逐渐转变为由升运挡板托运输送,当薯块被输送至“由垂直输送方向向水平输送方向过渡”的转角时(即第二转角),薯块在重力作用下,从凹型槽内滚动和滑落到托运输送筛上,随后被托运至分拣筛,完成薯块升运。环形减损集薯升运装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1 环形减损集薯升运装置主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of annular potato lifting device

参数	数值
装置尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 315×2 320×1 245
装置质量/kg	490
液压马达最大输出功率/kW	5
升运挡板数量	33
输送作业速度/(m·s ⁻¹)	0~1.5

2.1 升运输送带和升运挡板设计

升运输送带作为升运薯块的主要载体,主要由齿形橡胶带和输送网板构成,齿形橡胶带采用工业橡胶内衬尼龙布的方式制作而成;输送网板规律地安装在首尾相连的齿形橡胶带表面。为防止薯块从升运输送带两侧掉落,在输送网板两侧安装挡料边齿,如图 4 所示。

升运挡板主要由升运网板和栅条式组合链杆等构成,如图 5 所示。升运网板和输送网板均选用聚氨酯柔性材质和镂空式结构,聚氨酯柔性材质有较好的弹性和耐磨性能,减少薯块掉落时受到的

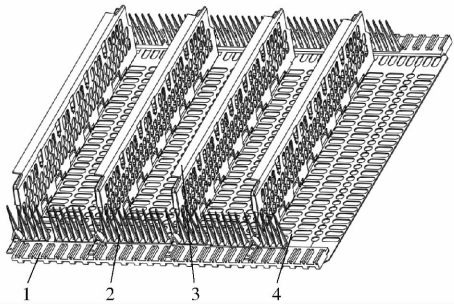


图 4 升运输送带和升运挡板结构简图
Fig. 4 Schematic of lifting conveyor belt and lifting baffle structure

1. 齿形橡胶带 2. 挡料边齿 3. 升运挡板 4. 输送网板

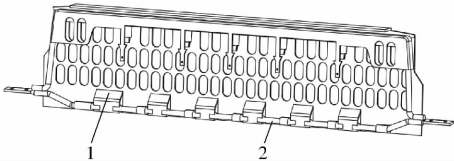


图 5 升运挡板结构简图
Fig. 5 Structure diagram of lifting baffle
1. 升运网板 2. 栅条式组合链杆

碰撞损伤,镂空式结构将参杂在薯块间的细小杂质和浮土进行除杂和过滤,降低收获机整体含杂率;栅条式组合链杆由链杆焊接组合而成,为升运挡板提供一定的结构支撑,提高结构强度。升运挡板以一定间距安装于升运输送带的表面,并与升运输送带呈一定夹角,防止薯块在升运过程中回流和掉落^[24]。

2.1.1 水平输送阶段马铃薯运动学分析

当薯块由清选装置抛落至升运输送带时,假设升运输送带发生弹性变形,薯块的动能和重力势能转变为升运输送带的弹性势能和薯块自身非弹性形变所消耗的能量,升运输送带变形达到最大后,升运输送带的弹性势能转化为薯块的重力势能、动能和其他的无用功,导致薯块被弹起。且升运输送带的运行方向与薯块抛落方向垂直,薯块与升运输送带表面存在一定摩擦力,使得薯块在升运输送带表面发生滚动和滑动,如图 6 所示。图中 h_d 为升运挡板高度,mm; l_{xd} 为相邻两升运挡板间距,mm; γ 为升运挡板与升运输送带间的夹角, ($^{\circ}$); G_s 为薯块重力, N; F_{s1} 为升运输送带对薯块的支持力, N。

对薯块在凹型槽内的运动过程进行分析,得

$$\begin{cases} M_{s1} = f_{s1} l_{s1} \\ E_{k1} + E_{p1} = E_t + E_s \\ E_t = E_{k2} + E_{p2} + W_e \end{cases} \quad (1)$$

式中 M_{s1} ——薯块受到的转矩, N·m
 f_{s1} ——升运输送带对薯块的摩擦力, N
 E_{k1} ——薯块抛落时的动能, J

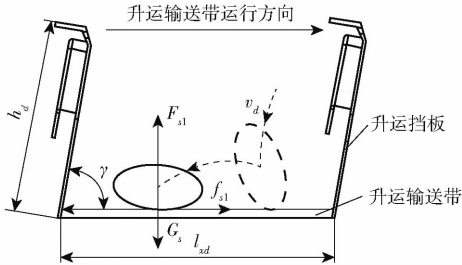


图 6 薯块在凹型槽内水平输送过程运动分析
Fig. 6 Analysis of potato horizontal transportation process

l_{s1} ——薯块质心与升运输送带间的距离, m
 E_{p1} ——薯块抛落时的重力势能, J
 E_t ——升运输送带弹性形变所消耗的能量, J
 E_s ——薯块非弹性形变所消耗的能量, J
 E_{k2} ——薯块弹起时的动能, J
 E_{p2} ——薯块弹起时的重力势能, J
 W_e ——薯块被弹起时的其他无用功, J

由式(1)可知,薯块在抛落至升运输送带表面时发生弹跳和滚动,部分薯块在滚动一段距离后与升运挡板接触,减少薯块在后续转角输送过程中的翻滚距离,降低薯块间的碰撞损伤。

2.1.2 第一转角输送过程分析

随着升运输送带的运行,薯块由水平输送向垂直输送过渡,即薯块处于第一转角时,如图 7 所示,对此过程的薯块进行理论分析,得

$$\begin{cases} F_{s2} \cos \alpha_1 + F_{ds1} \sin \beta_1 - G_s = 0 \\ F_{s2} \sin \alpha_1 - F_{ds1} \cos \beta_1 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_{s2} ——升运输送带对薯块的支持力, N
 F_{ds1} ——升运挡板对薯块的支持力, N
 α_1 ——支持力 F_{s2} 与垂直方向的夹角, ($^{\circ}$)
 β_1 ——支持力 F_{ds1} 与水平方向的夹角, ($^{\circ}$)

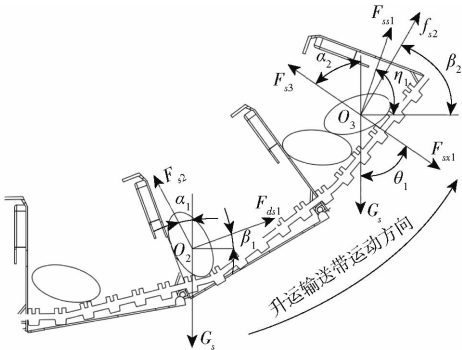


图 7 第一转角输送过程马铃薯受力分析
Fig. 7 Analysis of potato stress during the first corner conveying process

由式(2)可知,薯块随着升运输送带运行, α_1 和 β_1 逐渐增大,升运输送带对薯块的支持力逐渐减小,升运挡板对薯块的支持力逐渐增大,薯块的重力由被升运输送带承载逐渐向被升运挡板承载过渡,最后薯块稳定在升运挡板上被继续向上输送。

部分未与升运挡板接触的薯块由升运输送带单独托送,因升运输送带在第一转角保持一定速度进行圆周运动,薯块受到离心力作用,即

$$\begin{cases} F_{sx1} = m_s v_s^2 / R_{z1} \\ f_{s2} = \mu_1 (G_s \cos \theta_1 + F_{sx1}) \\ F_{s3} \cos \alpha_3 + f_{s2} \sin \beta_2 + F_{ss1} \sin \eta_1 - F_{sx1} \cos \theta_1 - G_s = 0 \\ F_{s3} \sin \alpha_3 - f_{s2} \cos \beta_2 - F_{ss1} \cos \eta_1 - F_{sx1} \sin \theta_1 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 F_{s3} ——升运输送带对薯块的支持力, N

F_{sx1} ——薯块圆周运动时的离心力, N

f_{s2} ——升运输送带对薯块的摩擦力, N

F_{ss1} ——薯块间作用力, N

α_2 ——支持力 F_{s3} 与垂直方向夹角, ($^\circ$)

β_2 ——摩擦力 f_{s2} 与水平方向夹角, ($^\circ$)

η_1 ——薯块间作用力与水平方向夹角, ($^\circ$)

θ_1 ——离心力 F_{sx1} 与垂直方向夹角, ($^\circ$)

μ_1 ——升运输送带与薯块间摩擦因数

m_s ——薯块质量, kg

v_s ——薯块运动速度, m/s

R_{z1} ——升运输送带第一转角运动半径, m

由式(3)可知,由于输送过程是不断运动的,即 α_2 、 β_2 、 η_1 和 θ_1 在转角输送过程不断变大,升运输送带对薯块的支持力逐渐减小,薯块间的作用力增大,部分未接触升运挡板的薯块逐渐发生滚动和滑动并向升运挡板靠拢;薯块所受离心力与转弯半径呈反比,转弯半径越小,离心力越大,薯块所受的挤压程度越大,且转弯半径过小会使相邻的升运挡板远离升运输送带端,在转弯时距离过近,两相邻升运挡板与升运输送带所组成的空间缩小过多,薯块承载量下降;转弯半径过大,该装置的整体体积偏大,空间利用不够合理,结合材料韧性、空间占有率,设第一转角半径为 600 mm。

在水平输送过程中相邻两升运挡板与升运输送带间组成的凹型槽开口方向向上,在垂直升运过程中凹型槽的开口方向向左,当相邻两升运挡板间距大于升运挡板高度时,在凹型槽开口方向由向上转变为向左时,凹型槽的最大容纳薯块量下降,薯块掉落机外的概率增加;当相邻两升运挡板间距小于升运挡板高度,垂直升运时造成凹型槽容纳薯块空间浪费。相邻两升运挡板间距过大时,凹型槽内因容纳的薯块过多,易造成薯块挤压损伤和切线擦伤等;相邻两升运挡板间距过小时,单位时间内掉落的薯块与升运挡板的碰撞频率增大,易造成碰撞损伤。结合分析并查阅文献[13,22,24],相邻两升运挡板间距 l_{xd} 设为 230 ~ 250 mm,升运挡板高度 h_d 设为

195 ~ 215 mm。

2.1.3 垂直输送阶段马铃薯运动学分析

在实际收获作业过程中,由于薯块在分离筛和清选装置的运动具有随机性,使得每个凹型槽内升运的薯块量存在一定差异,薯块被垂直升运输送时,为降低薯块脱离升运挡板、滑动和滚落出凹型槽的概率,升运挡板与升运输送带间存在一定夹角,对垂直升运输送的薯块进行分析,如图 8 所示。

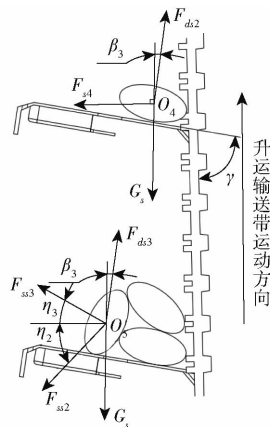


图 8 垂直输送升运过程马铃薯受力分析

Fig. 8 Analysis of potato stress during vertical transportation and lifting process

对薯块进行受力分析,得

$$\begin{cases} \beta_3 = \frac{\pi}{2} - \gamma \\ F_{ds2} \cos \beta_3 - G_s = 0 \\ F_{ds2} \sin \beta_3 - F_{s4} = 0 \\ F_{ds3} \cos \beta_3 + F_{ss3} \sin \eta_3 - F_{ss2} \sin \eta_2 - G_s = 0 \\ F_{ds3} \sin \beta_3 - F_{ss3} \cos \eta_3 - F_{ss2} \cos \eta_2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 F_{ds2} 、 F_{ds3} ——升运挡板对薯块的支持力, N

F_{s4} ——升运输送带对薯块的支持力, N

F_{ss2} 、 F_{ss3} ——薯块间作用力, N

β_3 ——支持力 F_{ds2} 、 F_{ds3} 与垂直方向夹角, ($^\circ$)

η_2 、 η_3 ——薯块间作用力与水平方向夹角, ($^\circ$)

升运挡板对薯块在水平方向的分力越大,薯块越不易掉落。由式(4)分析可知,在垂直升运输送过程中,升运挡板对薯块的支持力在水平方向的分力和升运挡板与升运输送带间的夹角呈反比。当升运挡板与升运输送带之间的夹角越小,升运挡板对薯块的支持力在水平方向的分力越大,薯块越易趋于稳定输送状态,当薯块由升运输送带向托运输送筛滚动和掉落时,易随着升运输送带继续运输,无法顺利落入托运输送筛,且夹角过小,导致凹型槽的薯块容量变小,影响装置的升运输送效率;升运挡板与升运输送带之间的夹角过大,装置运转伴随一定振动,部分薯块由于不稳定易滚动到升运挡板外,则升

运挡板与升运输送带间的夹角 γ 设为 $74^\circ \sim 80^\circ$ 。

2.2 托运输送筛设计

托运输送筛是薯块从升运输送带过渡到分拣筛的关键部件,主要由齿形橡胶带和托运杆条等构成,如图 9 所示。

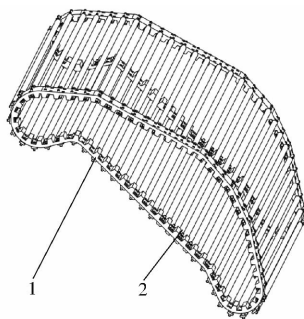


图 9 托运输送筛结构简图

Fig. 9 Structure diagram of transport and sieve delivery

1. 齿形橡胶带 2. 托运杆条

薯块随着升运输送带运转到第二转角,薯块在重力作用下逐渐从升运挡板掉落到托运输送筛,由于托运输送筛和升运输送带运行方向一致,托运输送筛将掉落的马铃薯继续输送,直到掉落到分拣筛上,如图 10 所示。

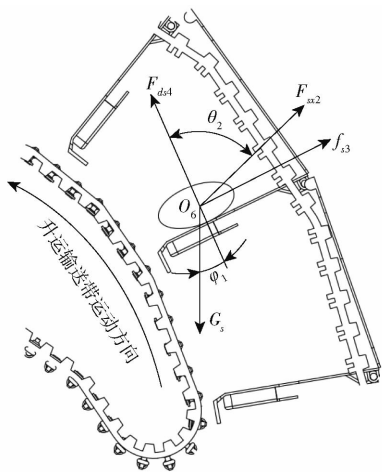


图 10 第二转角输送过程马铃薯受力分析

Fig. 10 Analysis of potato stress during the second corner conveying process

对薯块在第二转角输送过程进行受力分析,得

$$\begin{cases} F_{ds4} + F_{sx2} \cos \theta_2 - G_s \cos \varphi_1 = 0 \\ F_{sx2} \sin \theta_2 + f_{s3} - G_s \sin \varphi_1 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 F_{ds4} ——升运挡板对薯块的支持力, N

F_{sx2} ——薯块圆周运动时的离心力, N

f_{s3} ——升运挡板对薯块的摩擦力, N

φ_1 ——重力 G_s 与支持力 F_{ds4} 间的夹角, $(^\circ)$

θ_2 ——离心力 F_{sx2} 与支持力 F_{ds4} 间夹角, $(^\circ)$

由式(5)分析可知,由于升运输送带运行速度和第二转角半径不变, F_{sx2} 和 θ_2 的大小保持不变,随

着薯块的运动, φ_1 逐渐变大,重力沿着升运挡板方向的分力逐渐变大,当 $G_s \sin \varphi_1 = F_{sx2} \sin \theta_2 + f_{s3}$ 时,薯块开始沿着升运挡板向下滑动,掉落到托运输送筛筛面。当升运输送带的运行速度过大时,薯块所受离心力过大,离心力方向与薯块滑落方向相反,薯块易依附于升运挡板而不滑落;运行速度过小时,单个凹型槽接收薯块量增大,易造成薯块挤压损伤和切线擦伤,结合实际作业情况,马铃薯的收获速率处于一定波动状态,升运输送带运行速度设为 $0.8 \sim 1.2 \text{ m/s}$,可根据收获工况实时调整。为避免转弯半径过小,对升运输送带运输的薯块造成挤压等,结合材料韧性、空间占有率,第二转弯半径设为 600 mm 。

为配合升运输送带运动,避免因两带差速过大造成薯块表皮挤压擦伤,升运挡板远离升运输送带端线速度应与托运输送筛线速度比值保持在一定范围内,即

$$\begin{cases} v_t = \frac{v_y}{R_{z2}} (R_{z2} - h_d \sin \gamma) \\ r_t = R_{z2} - h_d \sin \gamma - h_j \end{cases} \quad (6)$$

式中 v_t ——托运输送筛运行速度, m/s

v_y ——升运输送带运行速度, m/s

R_{z2} ——升运输送带第二转角运动半径, m

r_t ——托运输送筛托运行半径, m

h_j ——升运挡板与托运输送筛配合间隙, m

因薯块一直处于滚动掉落状态,且装置运行伴有一定振动,则无法保证两带每处的配合间隙和速度相同,由式(6)可知,托运输送筛的托运行半径 r_t 与升运挡板和托运输送筛配合间隙 h_j 呈负相关,避免两带配合间隙过大造成漏薯现象,升运挡板与托运输送筛配合间隙设为 $10 \sim 15 \text{ mm}$,托运输送筛的筛面行程贯穿薯块的圆周运动,且托运输送筛托运末端呈一定向下倾斜角度,减少薯块掉落到分拣筛时的碰撞损伤,设托运输送筛托运末端与分拣筛间的跌落高度为 150 mm ,托运输送筛结构布置如图 11 所示。为保证托运输送筛一定的清土除杂作用和避免小薯块从托运杆条间隙掉落,托运杆条间隙设为 32.5 mm ,托运杆条直径为 8 mm ;为减损防损,托运杆条外表面套有 2 mm 厚的橡胶软管。为配合联合收获机的工作状况和保持装置的升运效率,升运输送带宽度、挡板长度和托运杆条长度设为 800 mm [24]。

3 关键参数耦合仿真优化

结合前文分析,为减少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升运输送能力,确定升运挡板与升运输送带间夹角、相邻两升运挡

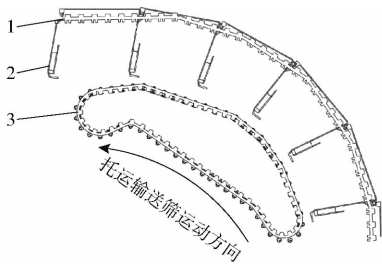


图 11 托运输送筛结构布置简图

Fig. 11 Schematic of layout of conveyor screen structure

1. 升运输送带 2. 升运挡板 3. 托运输送筛

板间距、升运挡板高度和升运输送带运行速度等参数对环形减损集薯升运装置具有重要意义。为验证装置合理性，确定装置的关键参数，采用 EDEM 2020 与 RecurDyn V9R4 耦合进行仿真分析。

3.1 仿真模型建立

3.1.1 马铃薯颗粒模型建立

随机选取 200 颗市场上常见的荷兰 15 号马铃薯，使用游标卡尺（精度 0.02 mm，量程 0 ~ 150 mm）对马铃薯三维尺寸进行测量并剔除马铃薯各轴的最大尺寸和最小尺寸，测量马铃薯平均三维尺寸为 98.6 mm × 63.3 mm × 51.3 mm，对薯块进行建模，如图 12 所示。

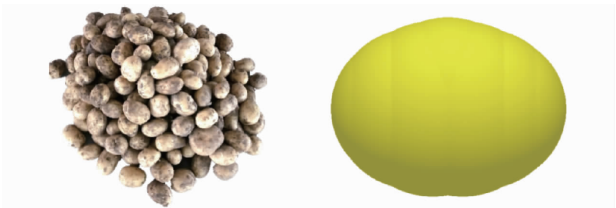


图 12 马铃薯实物和球体模型

Fig. 12 Potato physical and spherical models

以薯群三维均值为基准，将 194 颗马铃薯大致分为 7 类，计算各类数量占比，颗粒生成比例如表 2 所示。结合前期调研与初步试验，设定颗粒工厂以 6.7 kg/s 速率生成马铃薯颗粒，生成量根据仿真时间自动调整，颗粒工厂长度与环形减损集薯升运装置前方的清选装置宽度相同以配合实际工况，宽度根据薯群落入升运装置时的状态设定为 230 mm，其位置位于前方清选装置出料口处，马铃薯自由降落，根据分拣筛的高度和宽度在薯块升运结束位置（托运输送筛托运末端）下方设置一定边界，以模拟薯块跌落到分拣筛时所受的碰撞冲击，设定仿真步长为 0.000 25 s，仿真总时长为 7 s。

3.1.2 几何仿真模型建立

模型以 step 格式导入 RecurDyn 软件，设定升运驱动轮、托运驱动轮和限位胶轮空间位置，确定升运输送带和托运输送筛的空间位置和运行轨迹，添加哑元及运动副，在 RecurDyn – External SPI 模块中将

表 2 颗粒生成比例

Tab.2 Particle generation ratio

生成颗粒规格与主 颗粒规格比值	生成量比例/%	颗粒质量/g
0.7	4	142.5
0.8	9	162.9
0.9	17	183.2
1.0	47	203.6
1.1	14	224.0
1.2	7	244.3
1.3	2	264.7

相应子模型转化为 wall 文件，并导入 EDEM Geometries，建模过程如图 13 所示。

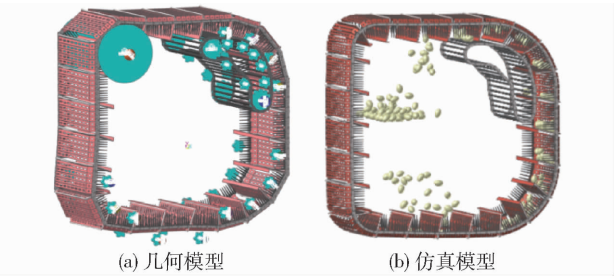


图 13 几何、仿真模型简图

Fig. 13 Sketch of geometric simulation mode

对升运挡板、升运输送带、挡料边齿和橡胶软管进行柔性处理，通过查阅文献[11, 25 – 27]，设定仿真基本参数如表 3 所示。

表 3 模型参数

Tab.3 Model parameter

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
薯块与橡胶间静摩擦因数	0.652
薯块与橡胶间动摩擦因数	0.303
薯块与橡胶间恢复系数	0.71
升运网板和输送网板密度/(kg·m ⁻³)	1 072
升运网板和输送网板泊松比	0.331
升运网板和输送网板剪切模量/MPa	221.4
橡胶软管和挡料边齿密度/(kg·m ⁻³)	1 800
橡胶软管和挡料边齿泊松比	0.3
橡胶软管和挡料边齿剪切模量/MPa	38.5

3.2 仿真结果分析

3.2.1 三因素三水平试验

通过前文分析，得到升运挡板高度取值范围为 195 ~ 215 mm，升运挡板与升运输送带间夹角取值范围为 74° ~ 80°，相邻两升运挡板间距取值范围为

230 ~ 250 mm,运用 Box - Behnken 中心组合设计方法,以上述变量为试验指标,马铃薯最大碰撞力作为评价指标,设计三因素三水平试验,试验因素编码如表 4 所示。

表 4 试验因素编码

Tab.4 Encoding of experimental factors

编码	因素		
	升运挡板高度	升运挡板与升运输送	相邻两升运挡板
	A/mm	带间夹角 B/(°)	间距 C/mm
-1	195	74	230
0	205	77	240
1	215	80	250

3.2.2 试验结果与方差分析

试验方案与结果如表 5 所示,建立回归模型拟合正交试验数据。最大碰撞力方差分析如表 6 所示,并进行显著性检验。

表 5 响应面试验方案与结果

Tab.5 Response surface test protocol and results

试验 序号	因素			马铃薯最大 碰撞力 Y/N
	升运挡板	升运挡板与升	相邻两升	
	高度 A/ mm	运输送带间夹 角 B/(°)	运挡板间 距 C/mm	
1	195	74	240	150.5
2	215	74	240	184.5
3	195	80	240	189.4
4	215	80	240	191.8
5	195	77	230	176.7
6	215	77	230	183.1
7	195	77	250	183.2
8	215	77	250	189.2
9	205	74	230	163.3
10	205	80	230	187.5
11	205	74	250	171.4
12	205	80	250	191.8
13	205	77	240	155.2
14	205	77	240	153.5
15	205	77	240	156.7
16	205	77	240	151.8
17	205	77	240	149.8

由表 6 可知,回归模型 $P < 0.0001$,表明各评价指标拟合模型极显著;失拟项 $P > 0.05$,不显著,表明方程模拟效果较好,A、B、AB、 A^2 、 B^2 、 C^2 对马铃薯最大碰撞力影响极显著,C对马铃薯最大碰撞力影响显著,其他因素影响不显著,对影响不显著项进行过滤后进行方差拟合,得出马铃薯最大碰撞力多元二次回归方程为

$$Y = 153.4 + 6.1A + 11.35B + 3.13C - 7.9AB + 15.1A^2 + 10.55B^2 + 14.55C^2$$

(7)

表 6 方差分析

Tab.6 Analysis of variance

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	4 243.98	9	471.55	32.37	<0.000 1
A	297.68	1	297.68	20.43	0.002 7
B	1 030.58	1	1 030.58	70.74	<0.000 1
C	78.13	1	78.13	5.36	0.053 7
AB	249.64	1	249.64	17.13	0.004 4
AC	0.040	1	0.040	2.746×10^{-3}	0.959 7
BC	3.61	1	3.61	0.25	0.633 9
A^2	960.04	1	960.04	65.89	<0.000 1
B^2	468.64	1	468.64	32.17	0.000 8
C^2	891.38	1	891.38	61.18	0.000 1
残差	101.99	7	14.57		
失拟项	72.33	3	24.11	3.25	0.142 3
误差	29.66	4	7.41		
总和	4 345.96	16			

3.2.3 响应面分析

通过响应面分析,明确各因素对评价指标的交互影响,以及各因素对马铃薯最大碰撞力的影响规律。对于马铃薯最大碰撞力,升运挡板高度和升运挡板与升运输送带夹角交互作用影响极显著,当相邻两升运挡板间距为 240 mm 时,响应面如图 14 所示。升运挡板高度和升运挡板与升运输送带夹角较小时,凹型槽内容纳的薯块量较少,且少量薯块在由升运输送带向托运输送筛过渡时,易依附于升运挡板而不滑落,导致掉落到分拣筛筛面外,当升运挡板与升运输送带夹角增加到一定值时,薯块在垂直升运过程中发生滑动和滚落出凹型槽现象,且薯块滑动和滚落出凹型槽的数量随着升运挡板与升运输送带夹角的增大而加大,薯块最大碰撞力呈升高趋势;当升运挡板与升运输送带夹角一定时,随着升运挡板高度的提高,凹型槽内容纳的薯块量提高,薯块在垂直升运过程中发生滑动和滚落出凹型槽的数量减

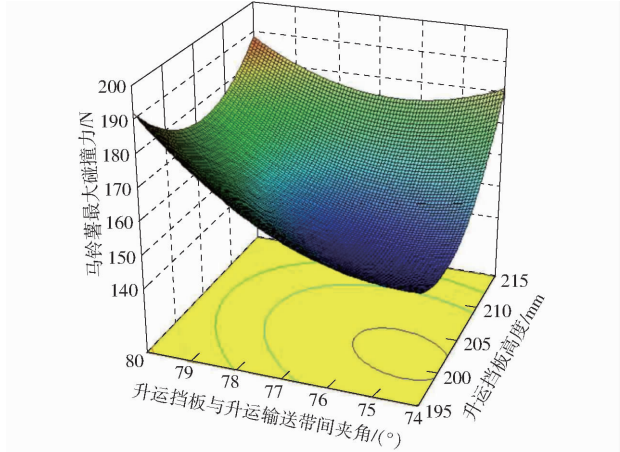


图 14 交互因素对马铃薯最大碰撞力影响的响应面

Fig.14 Response surface graph of influence of interaction factors on maximum collision force of potatoes

少,当升运挡板高度提高到一定值时,薯块在由升运输送带向托运输送筛过渡时,因滑落行程过长,导致掉落到分拣筛筛面外,且升运挡板高度过高,凹型槽内容量剩余过大,造成空间浪费,薯块最大碰撞力随着升运挡板高度的提高呈先降低后升高趋势。

3.2.4 参数优化分析

利用 Design-Expert 10 软件中参数优化模块进行优化,选取最优的参数组合。构建目标函数以及约束条件,目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Y(A,B,C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 195\text{ mm} \leq A \leq 215\text{ mm} \\ 74^\circ \leq B \leq 80^\circ \\ 230\text{ mm} \leq C \leq 250\text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

对上述指标进行优化求解,优化后的最优参数组合:升运挡板高度为 199.21 mm、升运挡板与升运输送带间夹角为 75.86°、相邻两升运挡板间距为 240.35 mm 时,最大碰撞力为 149.11 N。

4 验证试验

4.1 台架试验

4.1.1 试验条件

根据仿真结果,考虑到实际生产条件,升运挡板高度取 200 mm、升运挡板与升运输送带间夹角取 76°和相邻两升运挡板间距取 240 mm,加工制造后的环形减损集薯升运装置安装于装袋型马铃薯联合收获机上,进行台架试验。试验设备及仪器:东方红 ME354 型拖拉机、美国 Techmark 公司生产的三轴尺寸为 80 mm × 90 mm × 60 mm 的电子马铃薯、0~200 mm 游标卡尺、0~30 kg 电子秤、0~5 m 卷尺等;选用荷兰 15 号马铃薯,平均含水率约为 81%。随机选取表面无破皮、无损伤的 200 颗马铃薯(120~350 g),试验现场如图 15 所示。

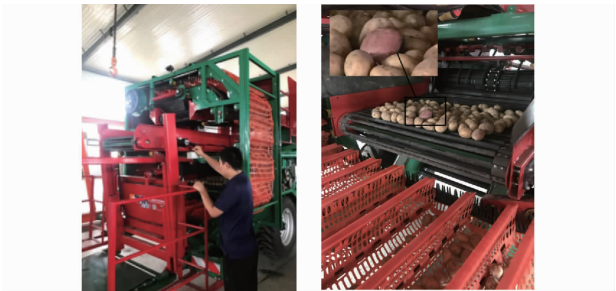


图 15 环形减损集薯升运装置台架试验

Fig. 15 Bench experimental of annular collecting and transporting device

4.1.2 评价指标

将破皮率和马铃薯碰撞加速度峰值作为试验指标,测量试验后破皮马铃薯的破皮面积,将破皮面积大于 0.2 cm² 的马铃薯标记并记录^[4,28-29]。

4.1.3 试验方案和结果

考虑作业速度和马铃薯产量等因素,上料量设为 24 t/h,升运输送带运行速度设为 0.8~1.2 m/s,升运输送带运行速度通过液压马达调节。为探究马铃薯损伤机理和获取马铃薯所受的碰撞加速度,将电子马铃薯分别放置于薯群的左侧、中部和右侧,电子马铃薯随着物料进入环形减损集薯升运装置,并随着入料的马铃薯进行翻滚和滑动,试验后电子马铃薯连接计算机获取碰撞信息,电子马铃薯每个位置分别进行 3 次试验,每组试验进行 5 次,碰撞检测过程如图 16 所示,破皮率和最大碰撞加速度峰值取均值,试验结果如表 7 所示^[30]。

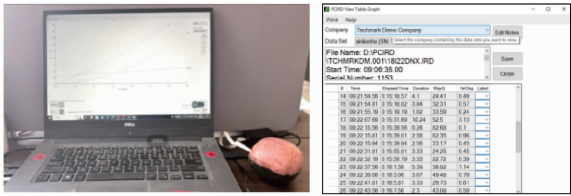


图 16 电子马铃薯检测碰撞过程及部分数据

Fig. 16 Electronic potato detection collision process and partial data

表 7 装置测试结果

Tab.7 Device test results

升运输送带 运行速度/ (m·s ⁻¹)	破皮 率/%	5 次碰撞加速度峰值/ (m·s ⁻²)	碰撞加速度峰 值平均值/ (m·s ⁻²)
0.8	1.13	648.8/596.8/643.9/	636.63
		702.7/590.9	
		600.7/590.9/575.3/	
1.0	1.06	549.8/649.7	593.29
		668.4/692.9/663.5/	
		719.3/648.0	
1.2	1.21		685.63

由表 7 可知,升运输送带运行速度较低时,单个凹型槽接收薯块量增大,薯块相互挤压,表皮擦伤和碰撞损伤较大;随着升运输送带运行速度的升高,单个凹型槽承载输送的薯块量减少,薯-薯挤压现象减轻,破皮现象减轻;升运输送带运行速度过大时,薯块与装置的碰撞力较大,从托运输送筛掉落到分拣筛的薯块初速度较大,易产生碰撞损伤,未出现马铃薯从环形减损集薯升运装置掉落机外现象,电子马铃薯的碰撞加速度峰值均小于马铃薯临界损伤阈值^[31-32]。

4.2 田间试验

在山西省吕梁市岚县进行田间试验,试验区种植品种为荷兰 15 号马铃薯,无滴灌带,单垄双行覆膜种植,沙壤土,土壤平均含水率 9.87%,收获前一周机械化杀秧,配有 4 个捡拾工进行捡拾清杂,在前期试验基础上,作业速度设定为 0.6、0.7、0.8 m/s,

升运输送带运行速度为 0.8 ~ 1.2 m/s,田间试验如图 17 所示。



图 17 田间试验

Fig. 17 Field experiment

以伤薯率和破皮率作为评价指标,田间试验结果如表 8 所示。

表 8 田间试验结果
Tab.8 Field experiment results %

收获速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	伤薯率		破皮率	
	国标值	测试值	国标值	测试值
0.6	0 ~ 2.0	0.94	0 ~ 3.0	1.09
0.7	0 ~ 2.0	1.06	0 ~ 3.0	1.21
0.8	0 ~ 2.0	1.12	0 ~ 3.0	1.33

试验过程中,环形减损集薯升运装置运行正常,未出现马铃薯掉落等现象,各部件配合协调。收获速度为 0.6、0.7、0.8 m/s 时,伤薯率为 0.94%、1.06%、1.12%,破皮率为 1.09%、1.21%、1.33%,满足 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》的要求。

田间结果表明:收获机作业速度为 0.6 m/s 时,挖掘的薯杂混合物量较少,通过透筛和清选除杂作用后的薯块表皮较为净洁,环形集薯升运装置的输运速度保持在 0.8 ~ 1.0 m/s,环形集薯升运装置凹型槽内的薯群挤压和碰撞程度较轻,薯块碰撞损

伤较轻;随着收获速度的提高,挖掘的薯杂混合物量增加,分离筛的分离量增大,未被透筛掉落的土块在清选装置的摩擦和揉搓作用下,解聚成小土块掉落地面,凹型槽内的薯群挤压和碰撞程度加大;当收获速度为 0.8 m/s 时,随着薯块量的增大,环形集薯升运装置输运速度保持在 1.0 ~ 1.2 m/s,分离筛和清选装置的分离量继续增大,因薯杂分离不及时凹型槽内出现少量的土块和石块,薯块和土块、石块相互碰撞较为剧烈,薯块损伤相对严重,未分离净的土块和石块由分拣筛两侧的分拣工人捡拾分离。

5 结论

(1)设计了一款马铃薯联合收获机环形减损集薯升运装置,通过对马铃薯的运动过程和碰撞特性分析,得到了影响升运效率和马铃薯损伤的主要因素为升运挡板高度、升运挡板与升运输送带间夹角、相邻两升运挡板间距和升运输送带运行速度。

(2)基于 DEM - MBD 耦合构建薯块和环形减损集薯升运装置仿真模型,得到最优参数组合。台架试验表明:上料量为 24 t/h 时,升运输送带运行速度为 0.8、1.0、1.2 m/s 时,电子马铃薯采集的 5 次碰撞加速度峰值平均值为 636.63、593.29、685.63 m/s^2 ,破皮率为 1.13%、1.06%、1.21%,碰撞加速度峰值均小于马铃薯临界损伤阈值。

(3)田间试验表明:收获机作业速度为 0.6、0.7、0.8 m/s 时,薯块伤薯率为 0.94%、1.06%、1.12%,破皮率为 1.09%、1.21%、1.33%,满足作业规范规定的作业要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 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)

[3] 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)

[4] 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)

[5] 魏忠彩,李学强,张宇帆,等. 马铃薯全程机械化生产技术与装备研究进展[J]. 农机化研究,2017,39(9): 1 - 6.
WEI Zhongcai, LI Xueqiang, ZHANG Yufan, et al. Reviews on technology and equipment of potato production[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9): 1 - 6. (in Chinese)

[6] 窦青青,孙永佳,孙宜田,等. 国内外马铃薯收获机械现状与发展[J]. 中国农机化学报,2019,40(9): 206 - 210.
DOU Qingqing, SUN Yongjia, SUN Yitian, et al. Current situation and development of potato harvesting machinery at home and

- abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 206–210. (in Chinese)
- [7] 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 马铃薯机械发展现状、存在问题及发展趋势[J]. 农机化研究,2015,37(12): 258–263.
Lǚ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. The development situation, existing problems and development trend of potato machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 258–263. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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.
Lǚ Jinqing, YANG Xiaohan, Lǚ 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)
- [10] 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)
- [11] 杨红光,胡志超,王冰,等. 马铃薯收获机械化技术研究进展[J]. 中国农机化学报,2019,40(11): 27–34.
YANG Hongguang, HU Zhichao, WANG Bing, et al. Research progress of harvesting mechanization technology of potato[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(11): 27–34. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] RUZHYLO Z, BULGAKOV V, ADAMCHUK V, et al. Experimental research into impact of kinematic and design parameters of a spiral potato separator on quality of plant residues and soil separation[J]. Journal of Agricultural Science, 2020, 31(2): 202–207.
- [19] 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.
- [20] 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)
- [21] 张兆国,李彦彬,王海翼,等. 马铃薯机械化收获关键技术与装备研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2021,36(6): 1092–1103.
ZHANG Zhaoguo, LI Yanbin, WANG Haiyi, et al. Research progress on key technology and equipment of potato mechanized harvest[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2021, 36(6): 1092–1103. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 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, Lǚ Danyang, REN Jiayi, et al. Design and test of potato quantitative weight bagging device [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(Supp. 1): 8–17. (in Chinese)

- [24] 盖金星,李学强,魏忠彩,等. 马铃薯高效低损产地贮运集薯装车机研制与试验[J]. 中国农机化学报,2022,43(4): 53–59.
GAI Jinxing, LI Xueqiang, WEI Zhongcai, et al. Development and test of potato loading machines for storage and transportation in potato producing area with high efficiency and low damage[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(4): 53–59. (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] 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)
- [27] 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)
- [28] 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(13): 50–57. (in Chinese)
- [29] 王相友,张蒙,李学强,等. 辊式导流马铃薯定重装袋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6): 159–168.
WANG Xiangyou, ZHANG Meng, LI Xueqiang, et al. Design and text of roller-guided potato fixed weight bagging machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 159–168. (in Chinese)
- [30] 杜小强,李党伟,贺磊盈,等. 基于电子果实技术的机械振动采收过程果实运动分析[J]. 农业工程学报,2017,33(17): 58–64.
DU Xiaoqiang, LI Dangwei, HE Leiyong, et al. Fruit motion analysis in process of mechanical vibration harvesting based on electronic fruit technique[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 58–64. (in Chinese)
- [31] 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)
- [32] 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)

(上接第 78 页)

- [20] 石林榕,杨小平,赵武云,等. 抛扬式膜际覆土马铃薯播种联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(6): 129–137.
SHI Linrong, YANG Xiaoping, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of potato combine seeder with throwing and covering soil on film edge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 129–137. (in Chinese)
- [21] 王方艳,孙光全,张钦. 电控锥盘式蔬菜播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4): 70–79.
WANG Fangyan, SUN Guangquan, ZHANG Qin. Design and experiment of electric control cone type vegetable seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 70–79. (in Chinese)
- [22] 史瑞杰,赵武云,戴飞,等. 全膜双垄沟膜面气流场与种床覆土互作过程模拟研究[J]. 农业机械学报,2022,53(11): 40–51.
SHI Ruijie, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Simulation of interaction between air flow field and soil seedbed covering on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 40–51. (in Chinese)
- [23] 戴飞,赵武云,宋学锋,等. 提土-全膜面覆土装置作业参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11): 88–96.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SONG Xuefeng, et al. Operating parameter optimization and experiment of device with elevating and covering soil on plastic-film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 88–96. (in Chinese)
- [24] ZHU X, GAO X, LI X, et al. Design and test of bilateral throwing soil-covering device for straw mulching machine in orchards [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(1): 162–171.
- [25] HANG C, GAO X, YUAN M, et al. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler[J]. Biosystems Engineering, 2018, 168: 73–82.