doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.032

马铃薯收获机低损阶梯式提升装置设计与试验

潘志国[1]　慕　杰[1]　杨然兵[1,2]　张　还[1]　吴洪珠[3]　杨德秋[4]
邓志熙[1]　胡卓凡[1]　舒亚龙[1]

(1.青岛农业大学机电工程学院,青岛 266109;2.海南大学机电工程学院,海口 570228;
3.青岛洪珠农业机械有限公司,青岛 266300;4.中机美诺科技股份有限公司,北京 100083)

摘要:针对丘陵山区马铃薯联合收获机提升行程长而导致伤薯率高的问题,结合丘陵山区收获模式,设计了一款马铃薯联合收获机低损阶梯式提升装置。在阐述总体结构及工作原理基础上,结合马铃薯抛落和提升过程分析,得到影响薯块损伤的关键因素。通过 RecurDyn-EDEM 耦合仿真模型,单因素试验得到柔性板与提升输送带间的夹角为 86°,以薯土分离装置末端的喂入量、薯土分离装置运行速度和低损阶梯式提升装置运行速度为试验因素,以马铃薯最大碰撞力为评价指标,运用 Box-Behnken 中心组合设计方法进行仿真试验,对试验结果进行方差分析,利用响应面分析了交互因素对试验指标的影响规律,确定影响因素的最佳取值。验证试验表明,当收获机柔性板与提升输送带间夹角为 86°、喂入量为 12.9 t/h、分离装置运行速度为 0.96 m/s、提升装置运行速度为 0.96 m/s 时,电子马铃薯碰撞加速度峰值平均值为 371.04 m/s^2,最大平均碰撞受力为 61.222 N,与参数优化后试验结果相差 1.92 N,平均伤薯率为 1.11%,均满足相关标准。

关键词:马铃薯收获机;提升装置;低损;丘陵山区
中图分类号:S225.7$^+$1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0375-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Low-damage Step-type Lifting Device for Potato Harvester

PAN Zhiguo[1]　MU Jie[1]　YANG Ranbing[1,2]　ZHANG Huan[1]　WU Hongzhu[3]
YANG Deqiu[4]　DENG Zhixi[1]　HU Zhuofan[1]　SHU Yalong[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao* 266109, *China*
2. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*
3. *Qingdao Hongzhu Agricultural Machinery Co., Ltd., Qingdao* 266300, *China*
4. *MENOBLE Co, Ltd., Beijing* 100083, *China*)

Abstract: A low-damage stepped lifting device for potato combined harvester was designed to address the issue of high tuber damage rates due to the long lifting stroke in hilly mountainous areas. The overall structure and working principle were analyzed, and through the analysis of the potato dropping and lifting process, the key factors affecting tuber damage were identified. A RecurDyn-EDEM coupled simulation model was utilized, and a single-factor experiment was conducted to determine that the angle between the flexible plate and the lifting conveyor belt should be set at 86°. The feed rate at the end of the potato-soil separation device, the operating speed of the separation device, and the operating speed of the low-damage stepped lifting device were considered as experimental factors, with the maximum impact force of the potato serving as the evaluation index. A Box-Behnken central composite design method was employed for the simulation experiments. Variance analysis was performed on the results of these experiments, and response surface analysis was used to study the influence of interactive factors on the test indicators, which led to the determination of the optimal values for the influencing factors.

收稿日期:2024-11-29　修回日期:2024-12-21
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2000904)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-09-P32)和青岛市科技惠民示范专项(23-2-8-xdny-2-nsh)
作者简介:潘志国(1977—),男,教授,主要从事农业机械装备研究,E-mail:peter_panzg@163.com
通信作者:杨然兵(1979—),男,教授,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail:yangranbing@163.com

Verification experiments demonstrated that when the angle between the harvester's flexible plate and the lifting conveyor belt was set at 86°, with a feed rate of 12.9 t/h, a separation device operating speed of 0.96 m/s, and a lifting device operating speed of 0.96 m/s, the average peak value of the electronic potato impact acceleration was found to be 371.04 m/s^2, and the maximum average impact force was 61.222 N, which deviated by 1.92 N from the experimental results after parameter optimization. The average tuber damage rate was 1.11%, which complied with the relevant standards.

Key words: potato harvester; lifting device; low loss; hilly and mountainous

0 引言

马铃薯是我国第四大粮食作物[1-3]。我国地形多样,地势复杂,大田马铃薯联合收获机难以适应丘陵山区[4]。为适应丘陵山区的地形和实现吨包功能,需要在尽可能小的空间内将薯块提升至适宜吨包的位置,但传统杆条输送需要较长的输送行程,增大了马铃薯收获机体积,不适合在丘陵山区作业。因此,在满足马铃薯联合收获机实现吨包的同时,低损收获是丘陵山区作业环境中马铃薯联合收获机需要攻克的难题。

国外对马铃薯联合收获机研发起步较早,技术完善,马铃薯收获机提升装置的种类也较多[5-6]。德国 GRIMME KT-75 型马铃薯收获机,采用直弯杆提升输送结构和吨包集收装置,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[7-8],但作业环境为平原或大面积农场,机组纵向尺寸较大,不适宜丘陵山区作业。日本松山株式会社研发的 GZA651 型马铃薯收获机,采用二级输送分离结构,薯块在挖掘铲挖出后经过一级输送分离机构对薯土进行分离,之后进入二级输送提升机构,使薯块运送到后端传送带,进行人工分级装箱[9-10],该提升输送机构存在伤薯率较高、漏薯率高等问题;比利时 Dewulf 公司生产的 Kwatro 系列自走式联合收获机采用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[11],但该装置过大,不适用于丘陵地区。

国内对马铃薯提升装置的研究取得了一些成果。杨然兵等[12]设计了一种立式环形分离输送装置,既满足了薯块的提升又可以过滤细小泥土,并且提高了整体空间的利用率,该装置放在收获机最后方,需较长输送过程,不适宜丘陵山区作业;中机美诺 1710A 型马铃薯收获机采用四级折叠提升臂装置,可满足不同装车高度,满足多工况低损装车,该装置需要配备运输车,不适宜丘陵山区作业;李学强等[13]设计了一种环形减损集薯升运装置,既满足了薯块升运的要求,又保证了较低的伤薯率,但该装置过大,不适用于丘陵山区作业。

本文基于丘陵山区的作业条件,设计一种配置于马铃薯联合收获机的低损阶梯式提升装置,通过对马铃薯抛落和提升过程分析,采用单因素试验与正交试验确定该装置最佳工作参数组合,并通过试验验证马铃薯的提升效果,为该作业工况下的马铃薯联合收获机的结构优化提供参考。

1 整机结构与工作原理

低损阶梯式提升装置安装在马铃薯联合收获机薯土分离装置和分拣装置之间,马铃薯联合收获机主要由挖掘装置、薯土分离装置、除秧装置、低损阶梯式提升装置、水平分拣装置、吨包装置、履带底盘、驾驶室等组成,如图 1 所示。

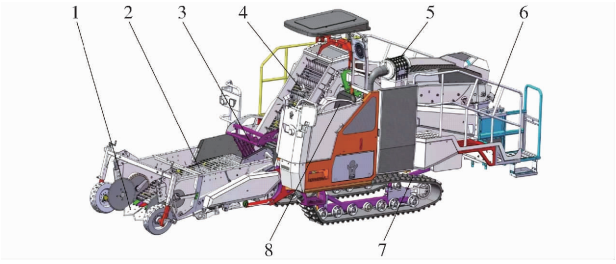


图 1 马铃薯联合收获机结构简图

Fig. 1 Schematic of potato combined harvester

1. 挖掘装置 2. 薯土分离装置 3. 除秧装置 4. 低损阶梯式提升装置 5. 水平分拣装置 6. 吨包装置 7. 履带底盘 8. 驾驶室

马铃薯联合收获机作业流程为薯块挖掘、薯土分离、薯秧分离、提升输送、人工分拣杂质、薯块吨包卸包。机组作业时,薯块与杂质经挖掘铲到达薯土分离装置,进行薯块与土壤的分离作业,分离后的薯块被抛落至低损阶梯式提升装置,在此期间,除秧装置将秧蔓分离出机器,低损阶梯式提升装置将薯块抛送至水平分拣装置,人工将未分离的秧蔓、石块等杂质进一步分离,清选后的薯块被抛送至吨包装置,吨包装满后将包袋卸落到地上,完成联合收获作业。

2 低损阶梯式提升装置设计

低损阶梯式提升装置主要包括传动轴、杆条、橡胶保护套、阶梯提升式齿状柔性板、机架、提升输送带、梅花轮、限位胶轮、挡板等,如图 2 所示。

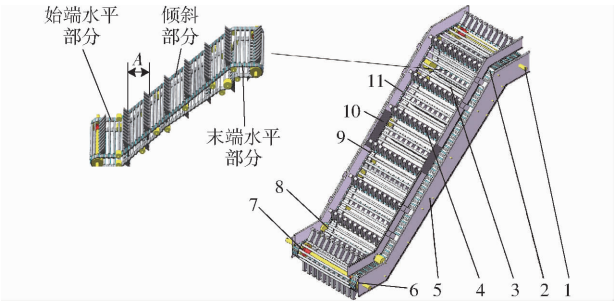


图 2　低损阶梯式提升装置结构简图

Fig. 2　Low-loss step elevation device

1. 传动轴　2. 杆条　3. 橡胶保护套　4. 阶梯提升式齿状柔性板　5. 机架　6. 提升输送带　7. 梅花轮　8. 限位胶轮　9. 下挡板　10. 中挡板　11. 上挡板

低损阶梯式提升装置通过机架安装在薯土分离装置后面，在阶梯提升式齿状柔性板作用下将薯土分离装置抛落过来的薯块进行提升输送。阶梯提升式齿状柔性板以一定的间距安装在杆条上，相邻阶梯提升式齿状柔性板之间的凹槽可容纳薯块。提升输送带采用平-斜-平的输送设计，倾斜部分与水平方向的角度设计为 45°，可有效保证马铃薯在提升过程中不发生滑落[14]。始端水平部分能够减少薯块在提升过程中跌落造成的漏薯现象，末端水平部分可以与水平分拣装置更好地衔接，减少碰撞。低损阶梯式提升装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1　低损阶梯式提升装置主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of low-loss stepped lifting device

参数	数值
尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 064×1 010×1 647
阶梯提升式齿状柔性板数量	16
装置倾角/(°)	45
喂入量/(t·h^{-1})	10～14
作业速度/(m·s^{-1})	0.8～1.2

2.1　阶梯提升式齿状柔性板结构与参数确定

2.1.1　阶梯提升式齿状柔性板结构设计

阶梯提升式齿状柔性板结构如图 3 所示，阶梯提升式齿状柔性板选用橡胶柔性材质，橡胶柔性材质有较好的弹性性能和耐磨性能[15-17]，减少薯块掉落时受到碰撞损伤；阶梯提升式齿状柔性板通过连接圆条成为一个整体，其上的缝隙可以将掺杂在薯块间的细小杂质和碎土壤进行除杂和过滤，降低薯块整体含杂率，其上的 U 形槽可以保证阶梯提升式齿状柔性板在杆条上前后移动，防止其在输送链上通过曲线位置时造成卡顿；阶梯提升式齿状柔性板以一定的间距安装在杆条上，通过 U 形槽和圆孔与杆条呈一定的夹角，并具有一定的支撑能力，防止薯块在提升的过程中出现回流和掉落。

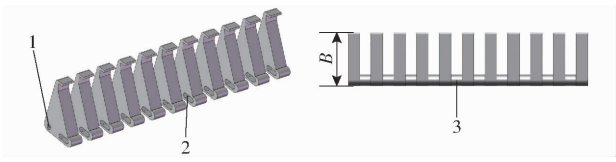


图 3　阶梯提升式齿状柔性板结构简图

Fig. 3　Schematic of stepwise lifting toothed flexible plate structure

1. 圆孔　2. U 形槽　3. 连接圆条

2.1.2　阶梯提升式齿状柔性板参数确定

相邻阶梯提升式齿状柔性板间距过大时，阶梯提升式齿状柔性板之间的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；相邻阶梯提升式齿状柔性板间距过小时，薯块容纳量过小，易发生回流和掉落，造成碰撞损伤。随机选取 200 颗荷兰 15 号马铃薯，对马铃薯三维尺寸进行测量，并剔除马铃薯三维尺寸的最大值和最小值，马铃薯的平均三维尺寸为 99.3 mm×64.5 mm×52.4 mm，凹槽不是完全贴合马铃薯大小，需要预留一定空间，确保薯块的抛入，考虑薯块存在长轴叠加情况(99.3×2=198.6 mm)，并扩大取值范围，相邻两阶梯提升式齿状柔性板间距 A 设为 150～400 mm。当阶梯提升式齿状柔性板高度过大时，阶梯提升式齿状柔性板易与机架、薯土分离装置等发生干涉；当阶梯提升式齿状柔性板高度过小时，倾斜输送时易发生薯块滚落，造成碰撞损伤。考虑会出现两个薯块短轴叠加的情况(64.5×2=129 mm)，并扩大取值范围，所以阶梯提升式齿形柔性板高度 B 设为 95～145 mm。

对相邻阶梯提升式齿状柔性板的间距进行单因素试验，试验中薯块抛落初速度为 1 m/s，低损阶梯式提升装置的速度为 1 m/s，阶梯提升式齿状柔性板与提升输送带的夹角为 90°，阶梯提升式齿状柔性板高度为 115 mm，随机选取 20 颗马铃薯，分析薯块从抛落到脱离低损阶梯式提升装置过程中，受力最高值的平均值和受力平均值的平均值，试验结果如图 4 所示。由图 4 可知，当间距较小时，凹槽内薯块容纳较少，发生薯块回流跌落，随着间距的增加凹槽内薯块容纳量增加，薯块跌落回流减少，当间距增加到一定值后，凹槽内薯块过多，发生薯薯碰撞，即随着阶梯提升式齿状柔性板间距的增加，薯块的最高受力值和平均受力值先减小后增加，结合实际生产取阶梯提升式齿状柔性板间距为 250 mm。

对阶梯提升式齿状柔性板的高度进行单因素试验，试验中薯块抛落初速度为 1 m/s，低损阶梯式提升装置的速度为 1 m/s，阶梯提升式齿状柔性板与提升输送带的夹角为 90°，阶梯提升式齿状柔性板

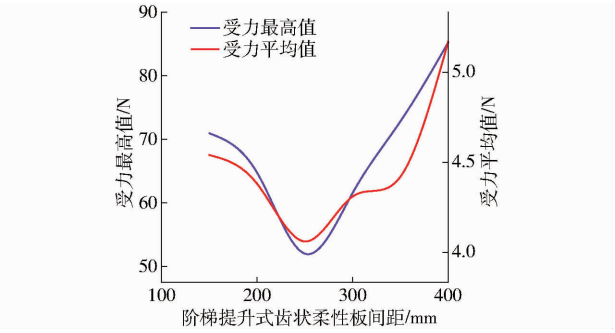


图 4 不同阶梯提升式齿状柔性板间距的薯块受力变化曲线

Fig. 4 Force variation curves of potato tubers under different step-elevating flexible toothed plate spacings

间距为 250 mm,分析薯块从抛落到脱离低损阶梯式提升装置过程中,受力最高值的平均值和受力平均值的平均值,试验结果如图 5 所示。由图 5 可知,当挡板高度较小时,薯块发生回流跌落柔性板的情况,随着高度的增加,薯块发生跌落回流的情况减少,当高度增加到一定值时,凹槽内薯块容纳量变多,易发生薯薯碰撞,即薯块随着阶梯提升式齿状柔性板高度的增加,薯块的受力最高值和受力平均值先减小后增加,结合实际生产取阶梯提升式齿状柔性板高度为 133 mm。

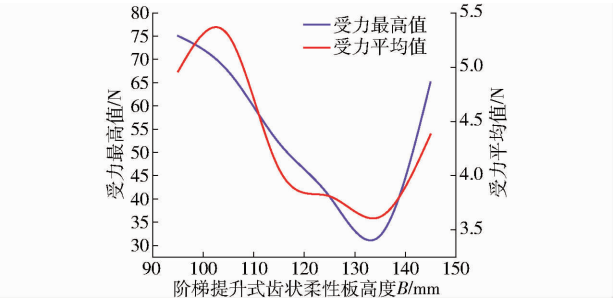


图 5 不同阶梯提升式齿状柔性板高度的薯块受力变化曲线

Fig. 5 Force variation curves of potato tubers under different heights of step-elevating flexible toothed plates

2.2 马铃薯抛落过程分析

2.2.1 无挡秧杆作用时马铃薯抛落过程分析

由于薯土分离装置与提升装置间存在一定的高度,使马铃薯产生斜抛运动,对这一过程进行理论分析,如图 6 所示。图中①表示马铃薯直接抛落到杆条上,②表示马铃薯抛落到柔性板上端,与柔性板碰撞后掉落到杆条上。

马铃薯抛落时的运动方程为

$$\begin{cases} L = v_0 t\cos\alpha \\ H = \dfrac{1}{2}gt^2 + v_0 t\sin\alpha \end{cases} \tag{1}$$

式中 L——马铃薯在水平方向位移,mm

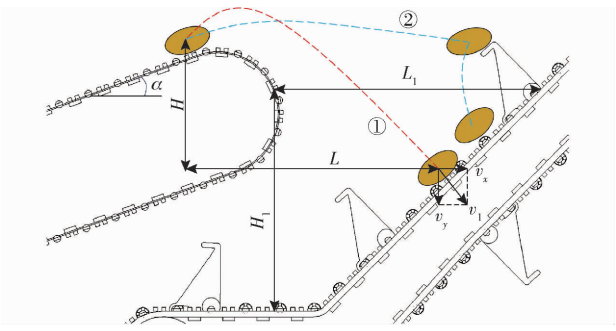


图 6 无挡秧杆作用时马铃薯抛落过程示意图

Fig. 6 Schematic of potato falling process without action of stalk barriers

H——马铃薯自薯土分离装置至提升装置跌落高度,mm

v_0——马铃薯被抛出瞬时速度,m/s

t——马铃薯自薯土分离装置至提升装置跌落用时,s

α——薯土分离装置与水平方向夹角,取 20°

g——重力加速度,取 9.8 m/s^2

马铃薯与提升装置发生碰撞时速度为

$$\begin{cases} v_x = v_0\cos\alpha \\ v_y = v_0\sin\alpha + gt \\ v_1 = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2\cos^2\alpha + (v_0\sin\alpha + gt)^2} \end{cases} \tag{2}$$

式中 v_x——马铃薯抛落至提升装置时水平方向速度,m/s

v_y——马铃薯抛落至提升装置时竖直方向速度,m/s

v_1——马铃薯抛落至提升装置的速度,m/s

由式(2)可知马铃薯抛落至提升装置的速度与马铃薯被抛出的瞬时速度、马铃薯自薯土分离装置至提升装置跌落高度有关。

2.2.2 有挡秧杆作用时马铃薯抛落过程分析

马铃薯在挡秧杆的作用下减速,通过查阅文献[18]可得马铃薯与 65Mn 钢-橡胶碰撞时产生的临界损伤碰撞速度为 2.344 m/s,马铃薯碰撞挡秧杆时的速度远远小于临界值,故此阶段将马铃薯看作弹性体,由于作用时间很短,忽略摩擦力做功。挡秧杆由于重心上移获得一部分重力势能,故马铃薯损失的动能与挡秧杆获得的重力势能相同。马铃薯的运行轨迹如图 7 所示。

根据能量守恒定律,得

$$\begin{cases} E_{pd} = \dfrac{1}{2}mv_0^2\cos^2\alpha + mgH_d \\ E_{pj} = E_{pd} - E_{pi} \end{cases} \tag{3}$$

式中 E_{pd}——马铃薯与挡秧杆碰撞前动能,J

E_{pj}——马铃薯与挡秧杆碰撞后动能,J

E_{pi}——挡秧杆获得的重力势能,J

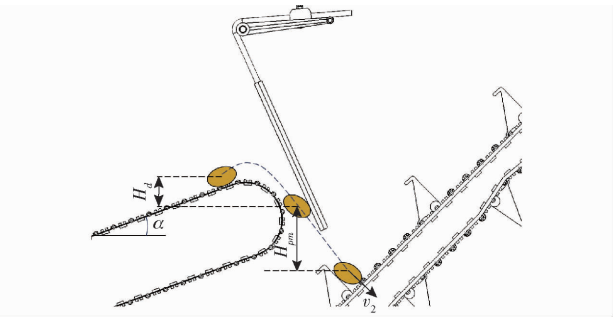


图 7　有挡秧杆作用时马铃薯抛落过程示意图

Fig. 7　Schematic of potato falling process with action of stalk guards

H_d——马铃薯与挡秧杆碰撞时马铃薯竖直方向运动距离，mm

m——马铃薯质量，kg

对挡秧杆进行旋转运动分析，挡秧杆获得的重力势能为

$$E_{pi} = m_1 g H_{pi} \tag{4}$$

式中　m_1——挡秧杆质量，kg

H_{pi}——挡秧杆重心上移距离，mm

经挡秧杆阻挡后马铃薯抛落到提升装置上，并在重力作用下获得动能 E_{pm}，有

$$\begin{cases} \dfrac{1}{2} m v_2^2 = E_{pj} + E_{pm} \\ E_{pm} = mgH_{pm} \end{cases} \tag{5}$$

式中　E_{pm}——马铃薯抛落后获得的动能，J

v_2——马铃薯刚与提升装置接触时的速度，mm/s

H_{pm}——马铃薯从接触挡秧杆到抛落到提升装置的高度，mm

根据速度与动能的关系式，联立式(3)～(5)得到薯块与提升装置接触时的瞬时速度 v_2 为

$$v_2 = \sqrt{v_0^2 \cos^2\alpha + 2g(H_d + H_{pm}) - 2gH_{pi}\frac{m_1}{m}} \tag{6}$$

由式(6)可知，薯块与提升装置接触时的瞬时速度主要与马铃薯被抛出瞬时速度、马铃薯自薯土分离装置至提升装置跌落高度、挡秧杆质量、薯块质量有关。

2.2.3　马铃薯撞击阶段能量分析

马铃薯抛落提升装置时主要存在 2 种方式，如图 6 所示。

马铃薯直接抛落到杆条上：马铃薯的动能转化为杆条变形产生的势能、马铃薯非弹性形变所消耗的功和马铃薯滑动时摩擦力产生的无用功，即

$$E_{pta1} = E_{ptb1} + E_{ptc1} + E_{ptf1} \tag{7}$$

式中　E_{pta1}——马铃薯与杆条接触前的动能，J

E_{ptb1}——杆条形变所消耗的功，J

E_{ptc1}——马铃薯在杆条上滑动时摩擦力所消耗的功，J

E_{ptf1}——马铃薯非弹性形变所消耗的功，J

为使马铃薯不产生损伤，E_{ptb1} 应尽可能地大，故在杆条上包裹一层橡胶保护套，可以在碰撞时吸收更多的能量，减少损伤。

马铃薯抛落到柔性板上端，与柔性板碰撞后掉落到杆条上：与柔性板碰撞后，马铃薯速度改变，碰撞过程符合动量守恒定律，有

$$m v_{pt2} - m v_{pt1} = \int_{t_1}^{t_2} F_{pt}\,\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中　v_{pt1}——碰撞柔性板前马铃薯速度，m/s

v_{pt2}——碰撞柔性板后马铃薯速度，m/s

t_1——马铃薯与柔性板碰撞前时刻，s

t_2——马铃薯与柔性板碰撞后时刻，s

F_{pt}——柔性板对马铃薯的碰撞力，N

由于碰撞时间较短，速度改变较大，马铃薯受到的碰撞冲击力较大，故柔性板的上端设计突出一块小平面，以增大与马铃薯的接触面积，降低马铃薯受到的局部压强，减少马铃薯受到的损伤。这个过程满足能量守恒，有

$$E_{pta2} = E_{ptb2} + E_{ptc2} + E_{ptf2} \tag{9}$$

式中　E_{pta2}——马铃薯与柔性板接触时动能，J

E_{ptb2}——柔性板形变所消耗的功，J

E_{ptc2}——马铃薯滑动时摩擦力所消耗的功，J

E_{ptf2}——马铃薯非弹性形变所消耗的功，J

由式(7)、(9)可知，马铃薯与提升装置接触时动能越大，马铃薯非弹性形变所消耗的功越大，易发生损伤。由式(1)、(2)、(6)可知，在薯块质量和挡秧杆质量等因素确定时，马铃薯与提升装置碰撞时速度主要与跌落高度、马铃薯被抛出的瞬时速度有关。为减少马铃薯受到的碰撞损伤且不影响马铃薯的输送效果，薯土分离装置末端到低损阶梯式提升装置的始端水平部分垂直距离 H_1 设为350 mm，薯土分离装置末端到提升装置水平距离 L_1 设为 400 mm，结合式(2)、(6)计算得抛落到提升装置速度远小于马铃薯临界损伤速度[18]。

2.3　始端水平部分与倾斜部分过渡处输送过程分析

通过式(1)、(2)可知大部分马铃薯抛落到倾斜部分，小部分因挡秧杆的缓冲或者马铃薯在提升装置上的回流，落到始端水平部分，在水平部分运动平稳后，马铃薯输送到始端水平部分与倾斜部分过渡处，对此处马铃薯受力分析，如图 8 所示。

对马铃薯进行受力分析得

$$\begin{cases} F_{N0}\cos\theta_0 = G + F_0\cos\theta_0 \\ F_{N0}\sin\theta_0 = F_0\sin\theta_0 \end{cases} \tag{10}$$

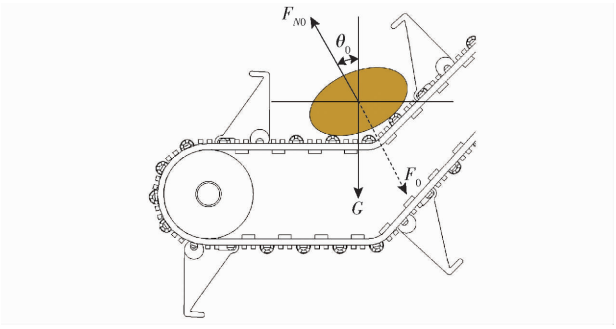


图 8 始端水平部分与倾斜部分过渡处输送过程示意图

Fig. 8 Schematic of conveying process at transition from horizontal to inclined section at beginning

式中 F_{N0}——杆条对薯块的支持力,N

F_0——离心力,N

G——马铃薯重力,N

θ_0——支持力与竖直方向夹角,(°)

此过程马铃薯因受到离心力的作用,转弯半径过小,易发生挤压损伤,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,设转角半径为 60 mm。

2.4 倾斜部分输送过程分析

薯块在倾斜输送过程中,为降低薯块滑动或滚落阶梯提升式齿状柔性板的概率,阶梯提升式齿状柔性板和输送链之间设置一定的夹角。对倾斜输送的薯块进行分析,如图 9 所示。

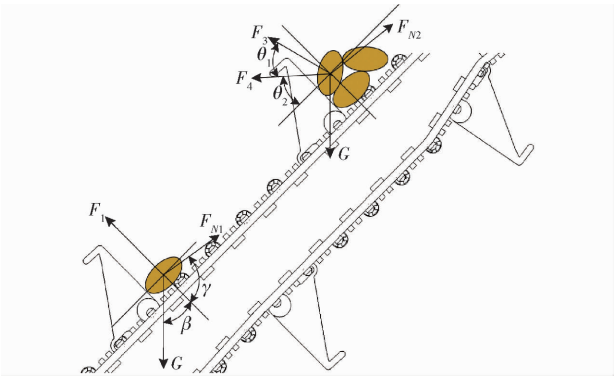


图 9 倾斜部分输送过程示意图

Fig. 9 Schematic of conveying process in inclined section

对薯块进行受力分析得

$$\begin{cases} G\cos\beta + F_{N_1}\cos\gamma = F_1 \\ G\sin\beta = F_{N_1}\sin\gamma \\ G\cos\beta + F_{N_2}\cos\gamma = F_3\sin(\theta_1+\theta_2) + F_4\sin\theta_2 \\ F_{N_2}\sin\gamma = G\sin\beta + F_4\cos\theta_2 + F_3\cos(\theta_1+\theta_2) \end{cases} \tag{11}$$

式中 F_1——杆条对薯块的支持力,N

F_{N_1}、F_{N_2}——阶梯提升式齿状柔性板对薯块的支持力,N

F_3、F_4——薯块间的相互作用力,N

θ_1——F_3 与 F_4 夹角,(°)

θ_2——F_4 与倾斜部分输送带夹角,(°)

β——倾斜部分输送带与水平方向夹角,(°)

γ——阶梯提升式齿状柔性板与输送带夹角,(°)

阶梯提升式齿状柔性板对薯块的支持力在垂直于输送带方向的分力和阶梯提升式齿状柔性板与输送带间的夹角成反比。当阶梯提升式齿状柔性板与输送带之间的夹角越小,阶梯提升式齿状柔性板对薯块的支持力在垂直于输送带方向的分力越大,薯块越易趋于稳定输送状态,但夹角过小,导致阶梯提升式齿状柔性板凹槽的薯块容量变小,影响装置的输送效率;阶梯提升式齿状柔性板与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阶梯提升式齿状柔性板外,则阶梯提升式齿状柔性板与输送带间夹角 γ 设为 80°~95°。

2.5 倾斜部分与末端水平部分过渡处输送过程分析

当薯块运动到倾斜部分和末端水平部分交界处时,提升装置做圆周运动,薯块受到离心力的作用。对此处薯块进行受力分析,如图 10 所示。

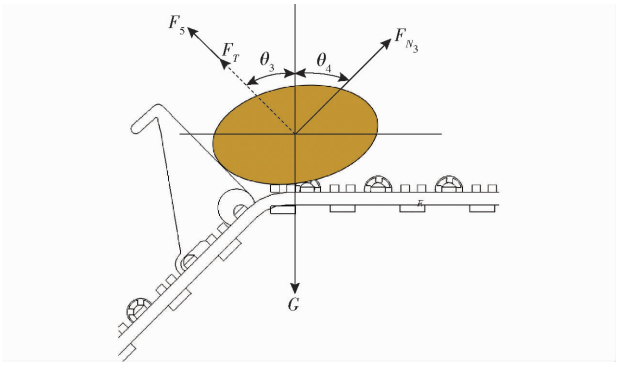


图 10 倾斜部分与末端水平部分过渡处输送过程示意图

Fig. 10 Schematic of conveying process at transition from inclined section to horizontal section at end

对薯块进行受力分析得

$$\begin{cases} G = F_{N_3}\cos\theta_4 + (F_5 + F_T)\cos\theta_3 \\ F_{N_3}\sin\theta_4 = (F_5 + F_T)\sin\theta_3 \end{cases} \tag{12}$$

式中 F_T——离心力,N

F_{N_3}——阶梯提升式齿状柔性板对薯块支持力,N

F_5——提升输送链对薯块支持力,N

θ_3——离心力与竖直方向夹角,(°)

θ_4——支持力与竖直方向夹角,(°)

倾斜部分和末端水平部分交界处薯块几乎平稳运行,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,设转角半径为 60 mm。

综上可知,薯块产生损伤与阶梯提升式齿状柔

性板倾角和薯土分离装置运行速度有关。低损阶梯式提升装置运行速度也是影响碰撞重要因素，当运行速度过大时，凹槽内薯块容纳较少，造成空间浪费；运行速度过小时，相邻柔性板之间的马铃薯物料量增加，马铃薯抛落到升运输送带时马铃薯相互之间的碰撞概率增加，且在倾斜部分输送马铃薯时，马铃薯掉落的几率增大。选取低损阶梯式提升装置运行速度为 0.8 ~ 1.2 m/s。此外，薯块喂入量也是影响薯块碰撞过程的重要因素[19]。

3　马铃薯抛落和提升过程耦合仿真试验

结合前文分析，可知柔性板与提升输送带间的夹角、喂入量、薯土分离装置运行速度和低损阶梯式提升装置运行速度等参数对薯块损伤影响较大。为验证装置合理性，确定装置的关键参数，采用 EDEM 与 RecurDyn 进行耦合仿真。

3.1　仿真模型建立

3.1.1　马铃薯颗粒模型建立

采用离散元法建立薯块模型，以准确表征薯块在低损阶梯式提升装置上的运动特征。对薯块进行建模，如图 11 所示。

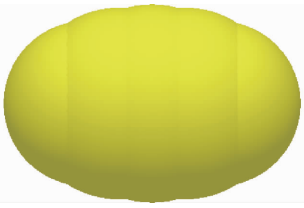


图 11　马铃薯球体模型

Fig. 11　Potato sphere model

结合前期调研与初步试验，设定颗粒工厂以速率 3.4 kg/s 生成马铃薯颗粒，生成量根据仿真时间自动调整，颗粒工厂长度与薯土分离装置宽度相同以配合实际工况，设定为 1 000 mm，其位置位于前方薯土分离装置，马铃薯自由降落，设定仿真步长为 0.01 s，仿真总时长为 9 s。

3.1.2　几何仿真模型建立

模型以 step 格式导入 RecurDyn 软件，添加运动副及接触，在 RecurDyn - External SPI 模块中将相应模型转化为 wall 文件，并导入 Edem Geometries，几何模型如图 12 所示。查阅文献[20 - 22]，设置仿真基本参数如表 2 所示。

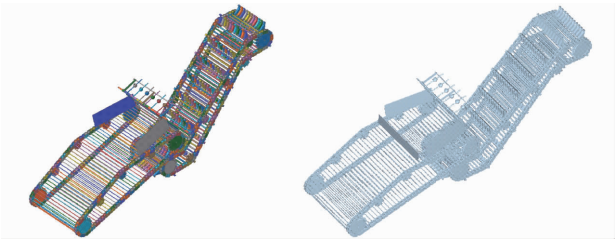


图 12　几何模型

Fig. 12　Geometric model

表 2　模型参数

Tab. 2　Model parameters

参数	数值
薯块密度/(kg·m^{-3})	1 120
薯块泊松比	0.50
薯块剪切模量/MPa	1.12
薯块间静摩擦因数	0.48
薯块间动摩擦因数	0.03
薯块间恢复系数	0.53
薯块与橡胶静摩擦因数	0.62
薯块与橡胶动摩擦因数	0.25
薯块与橡胶恢复系数	0.671
橡胶密度/(kg·m^{-3})	1 800
橡胶泊松比	0.47
橡胶剪切模量/MPa	38.46
65Mn 钢密度/(kg·m^{-3})	7 850
65Mn 钢泊松比	0.30
65Mn 钢剪切模量/MPa	7.8×10^4
薯块与 65Mn 钢静摩擦因数	0.44
薯块与 65Mn 钢动摩擦因数	0.27
薯块与 65Mn 钢恢复系数	0.79

3.2　仿真结果分析

3.2.1　单因素试验

为探究柔性板与提升输送带的夹角对薯块损伤的影响，结合前文分析，柔性板与提升输送带夹角 D 为 80° ~ 95°，试验中薯块抛落初速度为 1 m/s，低损阶梯式提升装置的速度为 1 m/s，阶梯提升式齿状柔性板高度为 133 mm，间距为 250 mm，分析薯块从抛落到脱离低损阶梯式提升装置过程中，受力最高值的平均值和受力平均值的平均值，结果如图 13 所示。由图 13 可知，当阶梯提升式齿状柔性板与提升输送带角度较小时，相邻阶梯提升式齿状柔性板之间的凹槽容纳薯块量较小，易发生滚落，随着阶梯提升式齿状柔性板与提升输送带角度的增加，凹槽内薯块容纳量增加，当阶梯提升式齿状柔性板与提升

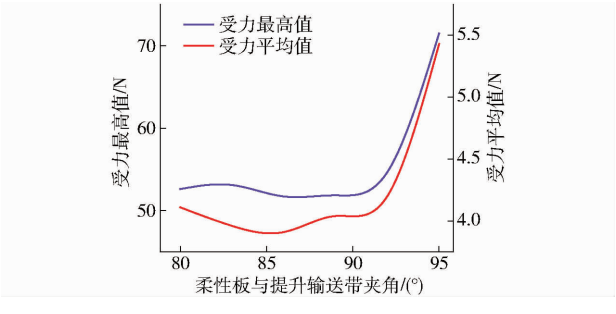
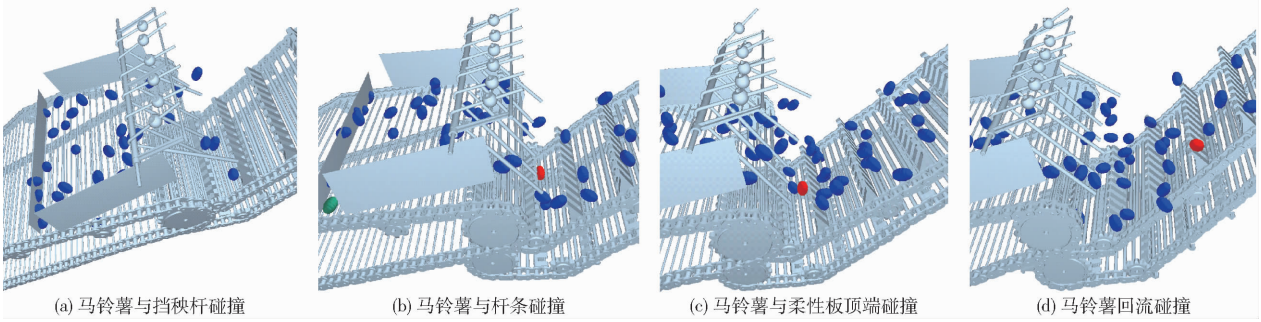


图 13　不同柔性板与提升输送带夹角的薯块受力仿真曲线

Fig. 13　Force variation curves of potato tubers at different angles between flexible plate and elevating conveyor belt

输送带角度增加到一定值时，薯块易发生滚落，即薯块的受力最高值和受力平均值先减小后增加，取阶梯提升式齿状柔性板间距与提升输送带的夹角为 86°。86°时马铃薯受力示意图如图 14 所示。在抛落阶段部分马铃薯与挡秧杆发生碰撞，速度减慢，如图 14a 所示；在与提升装置碰撞阶段，部分马铃薯与包裹橡胶保护套的杆条（如图 14b 所示）或柔性板顶端（图 14c）碰撞时，产生的碰撞力超过 200 N，易发生碰撞伤薯；在提升过程中，部分马铃薯产生回流，碰撞力超过 200 N，易发生碰撞伤薯，如图 14d 所示。



(a) 马铃薯与挡秧杆碰撞 (b) 马铃薯与杆条碰撞 (c) 马铃薯与柔性板顶端碰撞 (d) 马铃薯回流碰撞

图 14 马铃薯受力仿真结果

Fig. 14 Schematics of force on potato

3.2.2 三因素三水平试验

结合前文分析设喂入量为 10 ~ 14 t/h，低损阶梯式提升装置运行速度为 0.8 ~ 1.2 m/s，薯土分离装置运行速度为 0.8 ~ 1.2 m/s。运用 Box - Behnken 中心组合设计方法，将上述变量作为试验因素，马铃薯最大碰撞力 Y 作为评价指标，设计三因素三水平试验，试验因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Experimental factors encoding

编码	因素		
	喂入量/($t \cdot h^{-1}$)	提升装置运行速度/($m \cdot s^{-1}$)	分离装置运行速度/($m \cdot s^{-1}$)
-1	10	0.8	0.8
0	12	1.0	1.0
1	14	1.2	1.2

3.2.3 试验结果与方差分析

试验方案及结果如表 4 所示（X_1、X_2、X_3 为因素编码值），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 5 所示，并进行显著性检验。

由表 5 分析可知，回归模型 $P < 0.01$，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，X_1、X_2、X_1^2、X_2^2、X_3^2 对马铃薯最大碰撞力影响极显著，X_3、X_1X_2 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剔除后进行方差拟合，得出马铃薯最大碰撞力多元二次回归方程为

$$Y = 55.15 + 3.92X_1 + 5.17X_2 + 3.06X_3 - 4.29X_1X_2 + 14.64X_1^2 + 8.12X_2^2 + 9.44X_3^2 \quad (13)$$

3.2.4 响应面分析

通过仿真过程和结果分析可知，对于马铃薯最大碰撞力，喂入量与提升装置运行速度交互作用影响显著。当分离装置运行速度为 1 m/s 时，响应面如图 15 所示。当喂入量增大时，薯块与阶梯提升式齿状柔性板的碰撞几率减小，当喂入量增加到一定值时，薯块与薯块之间的碰撞频率增加，且柔性板之间的凹槽容纳的马铃薯易滚落出去，增加马铃薯的碰撞概率，即马铃薯最大碰撞力先降低后升高；当提升装置运行速度增大时，凹槽内的薯块减少，薯块之间碰撞的几率减少，当速度增大到一定程度时，薯块与阶梯提升式齿状柔性板之间的碰撞几率增加，即马铃薯最大碰撞力先降低后升高。

表 4 试验设计与结果

Tab. 4 Experimental design and results

试验序号	试验因素			马铃薯最大碰撞力 Y/N
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	0	62.25
2	1	-1	0	82.76
3	-1	1	0	81.62
4	1	1	0	84.96
5	-1	0	-1	74.77
6	1	0	-1	76.84
7	-1	0	1	79.91
8	1	0	1	85.37
9	0	-1	-1	64.63
10	0	1	-1	75.39
11	0	-1	1	70.86
12	0	1	1	79.93
13	0	0	0	56.56
14	0	0	0	51.84
15	0	0	0	55.45
16	0	0	0	58.76
17	0	0	0	53.12

3.2.5 参数优化分析

利用 Design-Expert 软件中参数优化模块进行

表 5　方差分析

Tab. 5　Analysis of variance

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2 209. 92	9	245. 55	26. 48	0. 000 1
X_1	123. 09	1	123. 09	13. 27	0. 008 3
X_2	214. 25	1	214. 25	23. 10	0. 002 0
X_3	74. 66	1	74. 66	8. 05	0. 025 1
X_1X_2	73. 70	1	73. 70	7. 95	0. 025 8
X_1X_3	2. 87	1	2. 87	0. 309 8	0. 595 1
X_2X_3	0. 714 0	1	0. 714 0	0. 077 0	0. 789 4
X_1^2	901. 92	1	901. 92	97. 26	<0. 000 1
X_2^2	277. 33	1	277. 33	29. 91	0. 000 9
X_3^2	375. 27	1	375. 27	40. 47	0. 000 4
残差	64. 91	7	9. 27		
失拟项	34. 72	3	11. 57	1. 53	0. 335 8
误差	30. 19	4	7. 55		
总和	2 274. 83	16			

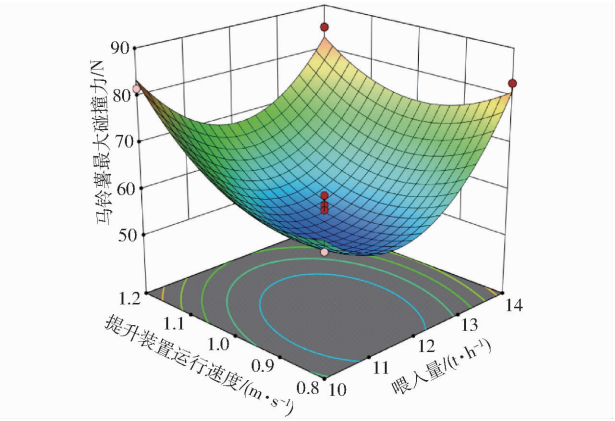


图 15　因素交互作用对马铃薯最大碰撞力影响的响应面($X_3=0$)

Fig. 15　Response surface of interaction effects among factors on maximum impact force of potato tubers

优化，选取最优的参数组合。构建目标函数以及约束条件

$$\begin{cases} \min Y(X_1,X_2,X_3) \\ \max X_1 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{14}$$

为尽可能保持较高喂入量的前提下降低马铃薯的最大碰撞力，对上述指标进行优化求解，得到最优参数组合为：喂入量 12. 909 t/h、提升装置运行速度 0. 959 m/s、分离装置运行速度 0. 963 m/s，此时马铃薯最大碰撞力为 59. 302 N。

4　田间验证试验

为验证装置性能，在青岛市青岛洪珠农业机械有限公司试验田进行验证试验，试验设备与仪器主要有马铃薯联合收获机、电子马铃薯(质量：165 g，内置的加速度传感器可以获取收获过程中受到的碰撞加速度)、游标卡尺、电子秤、吨包袋等，马铃薯品种为荷兰 15 号。土壤平均含水率 8. 78%，在试验过程中，喂入量为 12. 9 t/h(实际操作过程中取机组作业速度为 0. 73 m/s)、分离装置运行速度设为 0. 96 m/s，提升装置运行速度为 0. 96 m/s，以伤薯率、电子马铃薯碰撞加速度峰值作为评价指标。测量薯块破裂长度、观察薯块组织损伤程度，将破裂长度大于等于 5 mm 的薯块、组织淤伤及组织残缺薯块等视为损伤，将电子马铃薯混放于分离装置末端薯群，观察和记录薯块抛落和提升过程，利用电子马铃薯获取马铃薯碰撞信息，共测试 5 组试验，每组试验分别测试 3 次并取均值，验证试验如图 16 所示。其中伤薯率 Y_1 计算公式为

$$Y_1 = \frac{M_1}{M} \times 100\% \tag{15}$$

式中　M——吨包袋中薯块总质量，kg

M_1——吨包袋中损伤薯块质量，kg



图 16　验证试验

Fig. 16　Verification test

通过试验观察可得：薯块从薯土分离装置抛落到低损阶梯式提升装置的倾斜部分，低损阶梯式提升装置提升效果良好，少量薯块出现滚落阶梯提升式齿状柔性板现象，未出现马铃薯从低损阶梯式提升装置掉落机外现象，满足吨包要求的同时，可适应丘陵山区作业环境，测试结果如表 6 所示。

表 6　测试结果

Tab. 6　Test results

组号	伤薯率/%	马铃薯碰撞加速度峰值/(m·s^{-2})
1	1. 08	375. 49
2	1. 31	404. 58
3	0. 96	322. 22
4	1. 02	331. 58
5	1. 18	421. 34
平均值	1. 11	371. 04

由试验结果可知,利用电子马铃薯碰撞检测技术获得的马铃薯碰撞加速度峰值均小于马铃薯临界损伤阈值[23],平均碰撞加速度峰值 371.04 m/s^2。由公式 $F=ma$ 可得出电子马铃薯最大平均碰撞受力为 61.222 N,与参数优化后试验结果相差 1.92 N,平均伤薯率为 1.11%,满足 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》的要求,该装置在满足吨包要求的同时,马铃薯的提升输送效果较好,可满足丘陵山区作业需求。

5 结论

(1)设计了一种丘陵山区作业工况下配置于马铃薯联合收获机的低损阶梯式提升装置。为满足丘陵山区的作业环境,采用平-斜-平结构,满足收获后吨包的要求;为满足马铃薯的大坡度提升,设计了阶梯提升式齿状柔性板,通过单因素试验,确定柔性板间距为 250 mm,高度为 133 mm,阶梯提升式齿状柔性板间距与提升输送带的夹角为 86°。

(2)通过分析马铃薯从脱离薯土分离装置到抛落至提升装置的运动过程,确定了影响伤薯率的关键因素。通过三因素三水平仿真试验,得到试验因素与马铃薯最大碰撞力的回归模型,优化参数组合后,得到最佳工作参数:喂入量为 12.909 t/h、提升装置运行速度为 0.959 m/s、分离装置运行速度为 0.963 m/s,此时,马铃薯最大碰撞力为 59.302 N。

(3)使用最优参数进行田间验证试验,电子马铃薯采集的碰撞加速度峰值平均值为 371.04 m/s^2,得出电子马铃薯最大平均碰撞受力为 61.222 N,与参数优化后的试验结果相差 1.92 N,平均伤薯率为 1.11%,均满足相关标准。

参 考 文 献

[1] 刘毅君,何亚凯,吴晓媚,等. 基于改进 Faster R-CNN 的马铃薯发芽与表面损伤检测方法[J]. 农业机械学报,2024,55(1):371-378.
LIU Yijun, HE Yakai, WU Xiaomei, et al. Potato sprouting and surface damage detection method based on improved Faster R-CNN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):371-378. (in Chinese)

[2] 张乐,韩云飞,杜二小,等. 有机培肥措施对马铃薯光合特性、养分含量及其产量的影响[J]. 作物杂志,1-13.[2024-11-28]. https://link.cnki.net/urlid/11.1808.s.20241017.1235.002.
ZHANG Le, HAN Yunfei, DU Erxiao, et al. Effects of organic fertilization measures on photosynthetic characteristics nutrient content and yield of potato[J]. Crops,1-13.[2024-11-28]. https://link.cnki.net/urlid/11.1808.s.20241017.1235.002. (in Chinese)

[3] LU Y, KEAR P, LU X P, et al. The status and challenges of sustainable intensification of rice-potato systems in southern China [J]. American Journal of Potato Research,2021,98(5):361-373.

[4] CHEN Y Z, WANG Z Y, ZHANG H, et al. Investigation of the traveling performance of the tracked chassis of a potato combine harvester in hilly and mountainous areas[J]. Agriculture,2024,14(9):1625.

[5] WANG H C, ZHAO W Y, SUN W, et al. The design and experimentation of a wheeled-chassis potato combine harvester with integrated bagging and ton bag-lifting systems[J]. Agriculture,2024,14(9):1461.

[6] 李彦彬,张兆国,王圆明,等.马铃薯收获机多级输送分离装置设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2021,52(6):758-768.
LI Yanbin, ZHANG Zhaoguo, WANG Yuanming, et al. Design and experiment of multistage conveying and separating device for potato harvester[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2021,52(6):758-768. (in Chinese)

[7] 李传林. 马铃薯自动捡拾装置研发[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023.
LI Chuanlin. Research and development of potato automatic pickup device[D]. Yangling: Northwest A&F University,2023. (in Chinese)

[8] 王虎存,赵武云,孙伟,等. 马铃薯机械化收获技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2023,39(14):1-22.
WANG Hucun, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Research progress on the technology and equipment for potato mechanized harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(14):1-22. (in Chinese)

[9] 徐亚雷,张还,潘志国,等. 甘薯移栽与收获关键技术与装备[J]. 农业工程,2021,11(8):24-28.
XU Yalei, ZHANG Huan, PAN Zhiguo, et al. Key technology and equipment of sweet potato transplanting and harvesting[J]. Agricultural Engineering,2021,11(8):24-28. (in Chinese)

[10] 申海洋,王冰,胡良龙,等. 4UZL-1 型甘薯联合收获机薯块交接输送机构设计[J]. 农业工程学报,2020,36(17):9-17.
SHEN Haiyang, WANG Bing, HU Lianglong, et al. Design of potato connecting and conveying mechanism for 4UZL-1 type sweet potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(17):9-17. (in Chinese)

[11] 赵治明, 高强, 吕金庆. 马铃薯收获机薯土分离装置发展现状[J]. 中国马铃薯, 2024, 38(3): 236-244.
ZHAO Zhiming, GAO Qiang, LÜ Jinqing. Development status of potato-soil separation device of potato harvester[J]. Chinese Potato Journa,2024, 38(3): 236-244. (in Chinese)

[12] 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)

[13] 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)

[14] 杨德秋,汪昕,刘萌萌,等. 自走式马铃薯捡拾装袋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(1):85 - 95.
YANG Deqiu, WANG Xin, LIU Mengmeng, et al. Design and experiment of self-propelled potato collecting and bagging machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):85 - 95. (in Chinese)

[15] SHIRINI B, IMANINASAB R. Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials,2016,107:165 - 171.

[16] SRIRING M, NIMPAIBOON A, KUMARN S, et al. Enhancing viscoelastic and mechanical performances of natural rubber through variation of large and small rubber particle combinations[J]. Polymer Testing,2020,81:106225.

[17] 任宜辰. 混炼工艺参数对 NR/BR 并用胶的性能影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
REN Yichen. Study on the influence of mixing process parameters on the properties of NR/BR blends[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)

[18] 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)

[19] ENTINI M, CAPRARA C, MARTELLI R. Harvesting damage to potato tubers by analysis of impacts recorded withan instrumented sphere[J]. Biosystems Engineering,2006,94(1):75 - 85.

[20] 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)

[21] LIU X, CHEN K Z, WANG X, et al. Parameter optimization for a potato rod-type conveyor grading device based on the discrete element method[J]. Tehnički Vjesnik,2022,29(4):1354 - 1361.

[22] WANG J R, LIAO M, XIA H L, et al. Study on a novel reseeding device of a precision potato planter[J]. Agriculture,2024,14(10): 1824.

[23] 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. Measurement test analysis of potato restitution coefficient[J]. Journal of China Agricultural University,2017,22(9):93 - 100. (in Chinese)