

装袋型马铃薯联合收获机清选装置研制

王相友^{1,2}, 吕丹阳¹, 任加意¹, 张 蒙^{2,3}, 孟鹏祥^{2,3}, 李学强^{2,3}

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255091; 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. 山东思代尔农业装备有限公司, 德州 253600)

摘 要: 针对现有马铃薯联合收获机清选装置除杂率低、伤薯率和破皮率高等问题, 该研究以装袋型马铃薯联合收获机为基础, 设计了一种适用于黏重土壤条件下的清选装置。该装置通过清选辊与光辊交替排列、两辊差速转动的形式, 提升了对马铃薯收获物的清选效果。采用 Box-Behnken 响应面试验设计理论, 以上料量、装置倾角、清选辊转速、光辊转速、辊距和相对高度为影响因素, 以伤薯率、破皮率及除杂率为作业质量评价指标, 进行六因素三水平正交试验。建立各影响因素与指标之间的回归数学模型, 并分析各因素对响应值的交互影响, 同时对模型进行优化求解, 获得最优参数组合为: 上料量 4.3 kg/s、装置倾角 10.3°、清选辊转速 119 r/min、光辊转速 148 r/min、清选辊与光辊的辊距 16.8 mm、两辊相对高度 40.5 mm, 对应的伤薯率为 1.06%、破皮率为 0.54%、除杂率为 96.15%。对优化结果进行田间验证试验, 试验结果表明, 在最优参数组合下, 伤薯率为 1.10%、破皮率为 0.55%、除杂率为 95.04%, 满足马铃薯联合收获机的作业性能要求。研究结果可为黏重土壤条件下马铃薯联合收获机清选装置结构设计提供参考。

关键词: 农业机械; 设计; 试验; 马铃薯联合收获机; 清选装置; 黏重土壤

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.002

中图分类号: S225.7⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-Supp.-0008-10

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.002 <http://www.tcsae.org>

Wang Xiangyou, Lyu Danyang, Ren Jiayi, et al. Design and parameter optimization of the cleaning device for a bagged potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp.): 8-17. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.002 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国是全球马铃薯生产大国, 近年来马铃薯总种植面积达 5.73×10^6 hm², 总产量超 9 000 万 t, 均居全球首位^[1-3]。中国北方黏重土壤条件下, 不同类型的马铃薯收获机作业质量差别较大, 主要体现在收获物中常含有土块、石块、未完全木栓化的秧苗等杂质, 同时刚收获的马铃薯含水率较高, 表面粘附的土壤不易脱落^[4-5]。在此种作业条件下, 未安装清选装置的马铃薯收获机薯土分离效果较差, 存在收获物含杂率过高, 收获质量差等问题。因此, 在保证马铃薯收获质量的前提下, 安装清选装置是马铃薯联合收获机去除秧草、泥土及石块等杂质的关键。

国外对马铃薯联合收获机的研究起步早, 发展技术水平高, 清选装置的类型也较多^[6-7]。德国 GRIMME 公司生产的 SE150-60 自走式联合收获机上装有集筛土、清秧、传输一体的多功能清选网。清选网使用柔韧性强的聚氨酯材质, 在保证传输的同时, 也能防止可能造成的磕碰损伤^[8]。美国 Lockwood 公司生产的 472 型马铃薯联合收获机采用卷秧轮进行除秧作业, 具有卷秧轮与升运链间隙小, 升运杆条间隙大的特点^[9]。近年来国内也有学者对

马铃薯联合收获机的清选装置开展了相关研究。甘肃农业大学宋言明等^[10]设计了一种新型马铃薯联合收获机, 其清选机构采用滚动毛刷清选辊, 通过毛刷清扫马铃薯表层, 除掉杂物。东北农业大学吕金庆等^[11]研究设计了一种聚氨酯材料的马铃薯料斗机除杂辊, 与传统除杂装置相比, 除杂率明显提高, 能够较好地满足马铃薯仓储作业的要求。

综合研究现状可知, 国内外的清选装置主要分为网筛式和辊式两种。网筛式清选装置对薯块的损伤小, 但网眼易堵塞, 不适合黏重土壤条件下的清选作业; 辊式清选装置薯土分离效果好, 但伤薯率和破皮率较高。本文在对比两种清选装置优缺点的基础上, 设计了一种适用于装袋型马铃薯联合收获机的清选装置。为了得到清选装置工作参数的最佳组合, 搭建了多参数可调的清选装置试验台, 从理论上分析该装置关键部件的结构参数和运动参数, 运用台架试验和田间试验相结合的方法确定该装置工作参数的最佳组合, 以满足装袋型马铃薯联合收获机整体作业质量要求^[12-13]。

1 整机结构与工作原理

1.1 马铃薯基本物理特性

选取试验地点为山东省德州市乐陵市黄夹镇许家村, 试验时间为 2021 年 9 月, 研究对象为薯土混合物, 马铃薯品种为“希森 3 号”, 土壤类型为黏重土壤, 平均土壤含水率为 16.2%, 平均土壤容重 1.36 g/cm³。采用

收稿日期: 2022-07-05 修订日期: 2022-11-25

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目 (SD2019NJ010)

作者简介: 王相友, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农产品加工技术与装备, Email: wxy@sdlut.edu.cn

五点法进行田间取样,每个取样点选取 30 株马铃薯植株,得到马铃薯的主要物理参数如表 1 所示。

表 1 马铃薯主要物理特性参数
Table 1 Main physical parameters of potato

参数 Parameters	数值 Values
生长深度 Growth depth/mm	30~270
回转头直径 Diameter of the rotating surface/mm	50~80
长度 Length/mm	80~110
含水率 Moisture content/%	76.45

1.2 整机结构及技术参数

装袋型马铃薯联合收获机主要由牵引架、限深装置、切土挖掘装置、分离筛、机架、地轮、清选装置、置物台、装袋装置、升运装置、一级输送装置、二级输送装置、集薯箱等构成,其基本结构如图 1 所示。该联合收获机可一次完成两垄马铃薯的挖掘、薯土分离、输送和收集装袋等作业。该机主要技术参数见表 2。

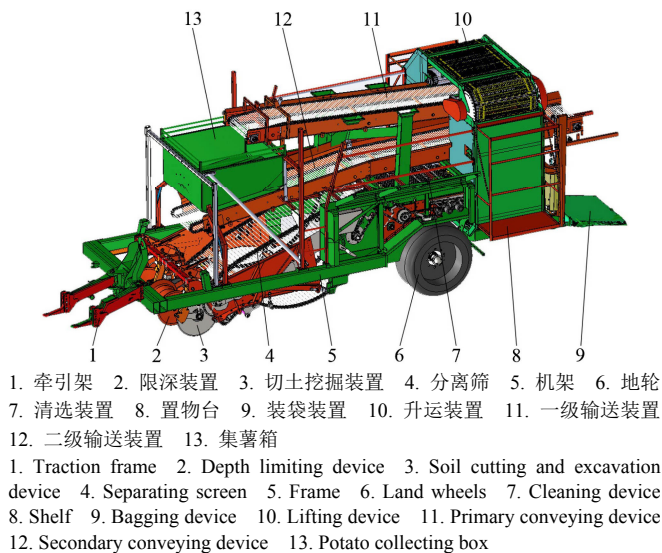


图 1 装袋型马铃薯联合收获机结构图

Fig.1 Structure diagram of bagged potato combine harvester

表 2 装袋型马铃薯联合收获机主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of bagged potato combine harvester

参数 Parameters	数值 Values
整机尺寸(长×宽×高) Machine size (Length×width×height)/(mm×mm×mm)	8 750×3 400×3 720
整机质量 Total weight/kg	5 800
适应垄宽 Adapt to ridge width/mm	≤700
作业幅宽 Working width/mm	1 700
纯工作时间生产率 Pure working time productivity/(hm ² ·h ⁻¹)	≥0.33

1.3 工作原理

根据农艺要求,马铃薯在收获之前需要进行杀秧作业,杀秧 7~10 d 后使用联合收获机进行收获^[14-15]。作业时,装袋型马铃薯联合收获机由拖拉机牵引向前运动,切土挖掘装置以一定的角度切开薯垄,马铃薯混合物被挖出后输送到分离筛。较大的土块在分离筛的震动作用下破碎,较小的土块、石块和秧苗等杂质通过分离筛的间隙落到机外,经过分离筛分离后的马铃薯进入到清选装置。在清选装置中,马铃薯不断与清选辊和光辊摩擦、

碰撞,去除粘附在表皮的泥土以及掺杂在收获物中的秧苗、杂草等杂质。清选后的马铃薯下落到清选装置后方的升运装置,由升运装置输送到一级输送装置。在一级输送装置上由人工筛选出受损马铃薯,未损伤的马铃薯再由集薯箱和二级输送装置运送到装袋装置进行收集装袋。

2 清选装置设计

清选装置是装袋型马铃薯联合收获机的关键部件,主要由光辊、清选辊、固定板、清选辊支撑臂、光辊支撑臂、加强管、外侧板、内侧板、悬挂架等构成,其示意图如图 2 所示。

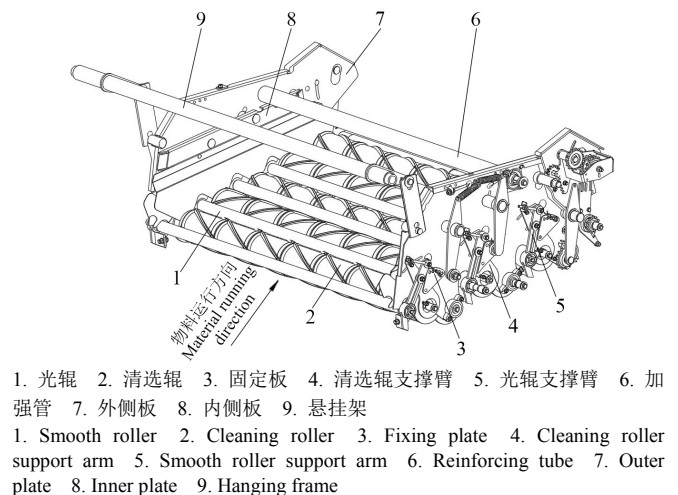


图 2 清选装置结构示意图

Fig.2 Structural diagram of cleaning device

清选装置安装在分离筛后方,其作用是接收分离筛输送来的马铃薯收获物,并在清选辊和光辊的作用下进行清选。清选辊与光辊交替排列、差速转动,以提升对马铃薯收获物的揉搓效果,进一步去除粘附在马铃薯表面的泥土和掺杂在收获物中的秧苗、杂草等。清选装置中的清选辊由 7 个清选套筒拼接而成,清选套筒外缘设计有螺旋扇叶,内部设计有螺旋孔,可以减少黏重土壤条件下马铃薯清选受到的损伤。清选过后的杂质通过清选辊和光辊之间的缝隙排出装置外,马铃薯在两辊的带动下继续前进,最终输送到升运装置。清选辊和光辊由液压马达提供动力,通过两侧的调节机构调节两辊的位置,从而满足不同收获条件下的清选作业需求。

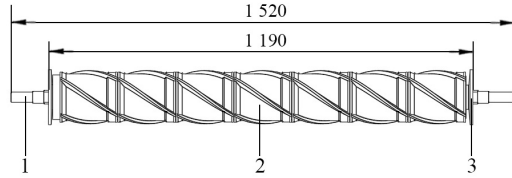
2.1 清选辊结构设计

为了减少马铃薯在清选过程中受到的损伤,提高清选率,本研究设计了一种适用于黏重土壤条件下的清选辊。如图 3 所示,清选辊主要由固定轴、清选套筒、挡板等组成。参考装袋型马铃薯联合收获机的整机尺寸及作业幅宽,设计清选辊总长为 1 520 mm,清选套筒安装总长为 1 190 mm。

2.1.1 清选套筒结构设计

清选套筒主要作用是去除粘附在马铃薯表面的泥土和收获物中的杂质,同时推动马铃薯收获物向前运动,其结构如图 4 所示。为了使相邻清选套筒配合紧密,对

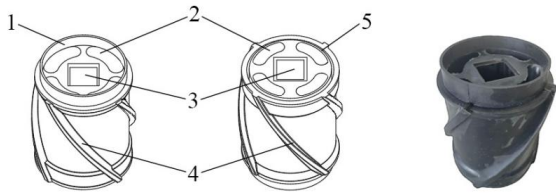
比不同高度和深度的清选套筒, 确定清选套筒一端有高度 20 mm 圆形凸起, 另一端开有深度 20 mm 圆形凹槽。清选套筒的外缘带有螺旋扇叶, 中心开有 300 mm×300 mm 的方孔, 方便清选套筒安装在固定轴上。为了减轻清选套筒的整体质量, 同时降低马铃薯在清选过程中的损伤, 清选套筒内对应各螺旋扇叶的位置均设有螺旋孔。螺旋孔的螺距和旋向等参数均与螺旋扇叶相同, 螺旋孔的横截面设计为宽度 22 mm 长圆弧形。



1. 固定轴 2. 清选套筒 3. 挡板
1. Fixed shaft 2. Cleaning sleeves 3. Baffle plate

图 3 清选辊结构图

Fig.3 Structure diagram of cleaning roller



a. 顶部轴测图 b. 底部轴测图 c. 实物图
a. Top axonometric view b. Bottom axonometric view c. Physical picture
1. 圆形凸起 2. 螺旋孔 3. 方孔 4. 螺旋扇叶 5. 圆形凹槽
1. Circular protrusion 2. Spiral hole 3. Square hole 4. Spiral fan blade 5. Circular groove

图 4 清选套筒结构图

Fig.4 Structure diagram of cleaning sleeve

为了防止马铃薯被辊轴拉入或者卡在两辊的间隙中, 清选套筒半径 r_1 应满足下式关系^[16]:

$$r_1 \leq \frac{d_k \cos \alpha_k - l}{2(1 - \cos \alpha_k)} \quad (1)$$

式中 d_k 为薯块回转面直径, mm; α_k 为清选套筒与马铃薯的摩擦角, ($^\circ$); l 为相邻辊间距, mm;

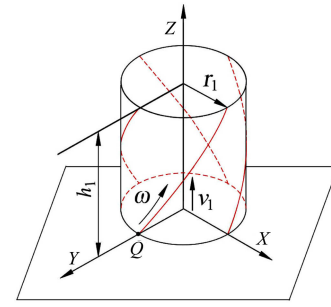
其中摩擦角 α_k 通过下式计算^[17]:

$$\alpha_k = \arctan \mu_1 \quad (2)$$

式中 μ_1 为马铃薯与清选套筒的摩擦系数。

根据 1.1 节薯块主要物理特性参数的测定结果, 回转面直径分布范围为 50~80 mm, 马铃薯与橡胶的摩擦系数为 0.583~0.694^[18]。为了使尽可能多的马铃薯向前运动, 本文马铃薯回转面直径 d_k 取 50 mm, μ_1 取平均值 0.652。参考现有装置的辊距参数, 取辊距 l 为 15 mm。将上述参数代入式 (1)~(2) 中, 计算得到清选套筒外缘半径 r_1 的最大值为 83.02 mm。考虑到清选套筒的加工安装和结构强度, 设计清选套筒半径 r_1 为 70 mm。

清选套筒外缘的螺旋扇叶可以去除粘附在马铃薯表面的泥土等杂质, 其结构参数影响清选效果。为了保证马铃薯在清选套筒上的均匀受力, 螺旋扇叶设计为等螺距的圆柱螺旋线。如图 5 所示, 螺旋扇叶为动点 Q 沿套筒圆柱面母线作速度 v_1 的匀速直线运动, 同时以等角速度 ω 绕同平面轴线 Z 旋转所形成的轨迹^[19]。



注: r_1 为清选套筒半径, mm; Q 为形成螺旋扇叶的动点, v_1 为 Q 沿母线的运动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; ω 为 Q 绕 Z 轴的旋转角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; h_1 为清选套筒高度, mm。
Note: r_1 is the radius of the cleaning sleeve, mm; Q is the moving point that forms the helical blade, v_1 is the speed of the point Q moving along the generatrix, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; ω is the angular velocity of the point Q rotating around the Z axis, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; h_1 is the height of the cleaning sleeve, mm.

图 5 螺旋扇叶结构简图

Fig.5 Sketch of the structure of the helical blade

螺旋扇叶在空间直角坐标系中的参数方程为

$$\begin{cases} x = r_1 \cos(\omega t) \\ y = r_1 \sin(\omega t) \\ z = \frac{L}{2\pi} \omega t \end{cases} \quad (3)$$

式中 L 为螺旋扇叶的螺距, mm; t 为动点 Q 运动的时间, s。

由式 (3) 可以看出, 螺旋扇叶的形状主要受清选套筒半径 r_1 和螺旋扇叶螺距 L 的影响。螺距过大, 会导致螺旋扇叶与马铃薯表面的接触面积减小, 无法有效去除粘附在马铃薯表面的泥土等杂质; 螺距过小, 会导致在清选作业过程中土块、石块等杂质卡在两相邻扇叶的沟槽中, 不仅使清选效果降低, 还会对螺旋扇叶造成一定的损伤, 螺距应满足关系式^[16]:

$$l_k < L \leq \pi(2r_1 + h_2) \cot \varphi \quad (4)$$

式中 l_k 为薯块长度, mm; h_2 为螺旋扇叶的高度, mm, φ 为螺旋升角, ($^\circ$);

根据 1.1 节中薯块主要物理参数测定结果, 取薯块长度最大值为 110 mm, 由式 (4) 计算出螺距 L 为 110~395 mm, 参考弹簧型清选辊结构参数, 确定螺距 L 为 340 mm, 螺旋扇叶高度 h_2 为 10 mm, 螺旋升角 φ 为 55° 。参考清选辊的总长及螺旋扇叶的螺距 L , 清选套筒的高度 h_1 取 170 mm, 1 根清选辊可依次安装 7 个清选套筒。

2.1.2 马铃薯与清选套筒接触点的力学分析

由 Hertz 接触理论可知, 马铃薯与清选套筒的初始接触点为马铃薯截面上的一个椭圆区域^[20], 如图 6 所示。

接触区的等效接触半径 c 为

$$c = \sqrt{ab} = \sqrt[3]{\frac{3G\rho}{4E^*}} \quad (5)$$

式中 G 为接触面总载荷, N; ρ 为综合曲率半径, mm; E^* 为当量弹性模量, Pa。

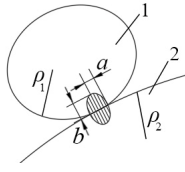
其中综合曲率半径 ρ 为

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (6)$$

当量弹性模量计算公式为

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \lambda_1^2}{E_1} + \frac{1 - \lambda_2^2}{E_2} \quad (7)$$

式中 E_1 为马铃薯的弹性模量, Pa; E_2 为清选套筒的弹性模量, Pa; λ_1 为马铃薯的泊松比; λ_2 为清选套筒的泊松比。



1. 马铃薯 2. 清选套筒

1. Potato 2. Cleaning sleeve

注: a 为接触区域长轴, mm; b 为接触区域短轴, mm; ρ_1 为马铃薯曲率半径, mm; ρ_2 为清选套筒曲率半径, mm。

Note: a is the long axis of the contact area, mm; b is the short axis of the contact area, mm; ρ_1 is the potato radius of curvature, mm; ρ_2 is the scavenging sleeve radius of curvature, mm.

图6 马铃薯与清选套筒接触示意图

Fig.6 Schematic diagram of the contact between the potato and the cleaning sleeve

马铃薯与清选套筒接触区的压缩量 δ 为

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{9G^2}{16E^*\rho}} \quad (8)$$

最大接触应力 G_0 为

$$G_0 = \frac{3G}{2\pi ab} = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{6GE^*}{\rho}} \quad (9)$$

由式(5)~(9)可以看出, 马铃薯与清选套筒接触时的等效接触半径 c 、压缩量 δ 和最大接触应力 G_0 主要受二者的曲率半径、弹性模量和泊松比影响。为了减少马铃薯与清选套筒之间的接触应力, 清选套筒的材料选择弹性模量和泊松比较大的橡胶。由式(9)可知最大接触应力 G_0 和综合曲率半径 ρ 成反比, 当清选套筒与马铃薯接触时, 清选套筒因为内部有螺旋孔的存在其表面会产生一定的凹陷, 使得综合曲率半径 ρ 变大, 最大接触应力 G_0 变小, 从而达到减损的目的。

2.2 光辊结构设计

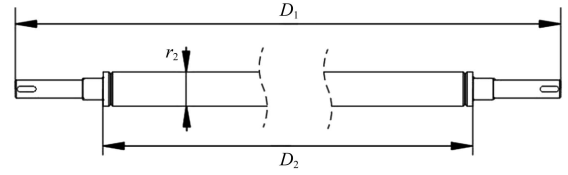
相邻清选辊之间设有与其转向相同转速略快的光辊, 其结构如图7所示。光辊不仅可以对马铃薯混合物的前进起到一定的阻碍作用, 同时增加了马铃薯在清选装置上的运动时间, 进而提升黏重土壤条件下的清选效果。为了提升对土块的破碎效果, 减少马铃薯翻过光辊的阻力, 光辊的材料选用强度大、摩擦系数小的合金钢。参考相关机型的结构参数^[21-23], 并结合1.1节中马铃薯回转身分布范围, 确定光辊半径 r_2 为 30 mm。根据装袋型马铃薯联合收获机的作业宽度及清选辊的结构参数, 设计光辊整体长度 D_1 为 1 520 mm, 中部圆辊长度 D_2 为 1 190 mm。

2.3 调节机构设计

为了使清选装置满足不同工况下的作业需求, 清选装置外侧板上安装有调节机构。如图8所示, 调节机构主要由顶紧螺栓、调节凹槽、光辊支撑臂、光辊轴承座、定位销、固定板、清选辊支撑臂、清选辊轴承座等组成。

如图9a所示, 当顶紧螺栓处于锁死状态时, 调节定位销在固定板上的不同位置, 使光辊支撑臂和清选辊支撑臂整体以铰接点为中心前后转动, 从而实现两辊相对高度的调节。如图9b所示, 当定位销处于锁死状态时, 调节顶紧螺栓伸出的长度, 使光辊支撑臂和清选辊支撑臂

臂分别向不同方向转动, 从而实现两辊辊距的调节。



a. 结构简图

a. Structure sketch



b. 实物图

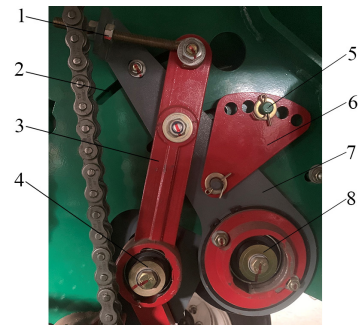
b. Physical picture

注: D_1 为光辊整体长度, mm; D_2 为中间圆辊长度, mm; r_2 为光辊半径, mm。

Note: D_1 is the overall length of the smooth roller, mm; D_2 is the length of the middle round roller, mm; r_2 is the radius of the smooth roller, mm.

图7 光辊

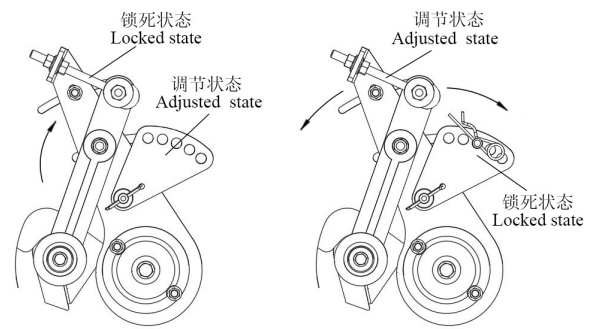
Fig.7 Smooth roller



1. 顶紧螺栓 2. 调节凹槽 3. 光辊支撑臂 4. 光辊轴承座 5. 定位销 6. 固定板 7. 清选辊支撑臂 8. 清选辊轴承座
1. Tightening bolt 2. Adjustment groove 3. Smooth roller support arm 4. Smooth roller bearing seat 5. Positioning pin 6. Fixing plate 7. Cleaning roller supporting arm 8. Cleaning roller bearing seat

图8 调节机构

Fig.8 Adjustment mechanism



a. 相对高度调节 a. Relative height adjustment
b. 辊距调节 b. Roller distance adjustment

图9 机构调节示意图

Fig.9 Schematic diagram of mechanism adjustment

2.4 辊组数量确定

在清选作业过程中, 马铃薯会受到相邻清选辊和光辊的摩擦力, 摩擦时间过长会增加伤薯率和破皮率, 过短会降低清选效果。为了得到最合适的辊数, 参考国内外清选装置的参数结构^[8-11], 选取 3~7 根清选辊进行进行单因素试验, 其中 2 根清选辊中间安装 1 根光辊。试验中控制上料量 4.5 kg/s、装置倾角 10°、清选辊转速 120 r/min、光辊转速 145 r/min、清选辊和光辊的辊距 16 mm、两辊相对高度 40 mm, 以伤薯率、破皮率和除杂率为试验指标, 试验结果如图 10 所示。由图 10 可以看

出, 清选辊数达到 5 时, 除杂率趋于稳定, 伤薯率和破皮率增速明显。结合装置实际情况, 确定清选辊数为 5, 光辊数为 6。为了防止马铃薯受单向力造成的堆积, 相邻清选辊螺旋扇叶的旋向相反。

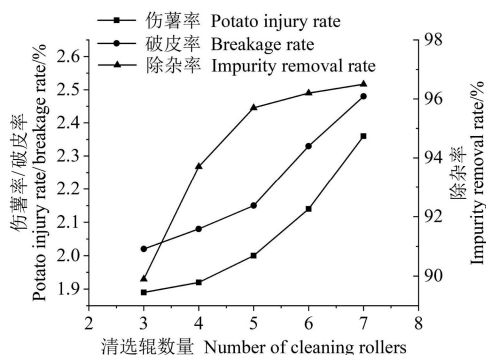


图 10 辊组数量单因素试验

Fig.10 Single factor test of the number of roll groups

2.5 马铃薯在辊组上的力学分析

在清选装置中, 清选辊与光辊的转动形式为差速转动。为了保证马铃薯能够稳定向前运动, 本文对马铃薯翻过清选辊和光辊的受力进行分析。

马铃薯翻过光辊的时的受力分析如图 11 所示。力对物体的作用效应使物体的运动状态发生改变, 包括转动和移动, 其中转动效应用力矩来度量, 移动效应用力矢来度量^[17]。马铃薯能够顺利转动过光辊的条件为马铃薯对 O_2 点的合力矩 M_{o2} 或者沿着 O_2 点的向上切线上的合力 F_{o2} 大于等于 0。

$$\sum M_{o2} = mgb_1 \sin \beta_1 + f_1(a_1 + b_1 \sin(\alpha_1 - \frac{\pi}{2})) - N_1 b_1 \sin(\pi - \alpha_1) \geq 0 \quad (10)$$

$$\sum F_{o2} = N_1 \sin(\pi - \alpha_1) - f_1 \sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_1) + f_2 - mg \sin \beta_1 > 0 \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} f_1 = \mu_1 N_1 \\ f_2 = \mu_2 N_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中 μ_2 为光辊摩擦系数。

将式 (12) 代入式 (10) ~ (11) 得到马铃薯翻过光辊的条件为

$$\sum M_{o2} = mgb_1 \sin \beta_1 + \mu_1 N_1(a_1 + b_1 \sin(\alpha_1 - \frac{\pi}{2})) - N_1 b_1 \sin(\pi - \alpha_1) \geq 0 \quad (13)$$

$$\sum F_{o2} = N_1 \sin(\pi - \alpha_1) - \mu_1 N_1 \sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_1) + \mu_2 N_2 - mg \sin \beta_1 > 0 \quad (14)$$

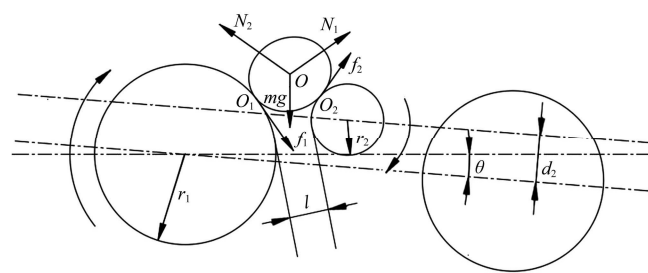
同理, 马铃薯翻过清选辊的条件为

$$\sum M_{o4} = mgb_2 \sin \beta_2 + \mu_2 N_3(a_2 + b_2 \sin(\alpha_2 - \frac{\pi}{2})) - N_3 b_2 \sin(\pi - \alpha_2) \geq 0 \quad (15)$$

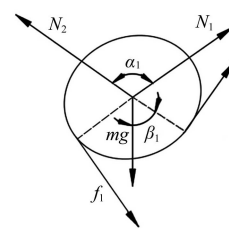
$$\sum F_{o4} = N_3 \sin(\pi - \alpha_2) - \mu_2 N_3 \sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_2) + \mu_1 N_4 - mg \sin \beta_2 > 0 \quad (16)$$

式中 a_2 为马铃薯的质心 O 到与光辊接触点 O_3 的直线距离, mm; b_2 为马铃薯的质心 O 到与清选辊接触点 O_4 的直线距

离, mm; N_3 为马铃薯翻过清选辊时光辊对马铃薯的支持力, N; N_4 为马铃薯翻过清选辊时清选辊对马铃薯的支持力, N; α_2 为支持力 N_3 和 N_4 形成的夹角, ($^\circ$); β_2 为支持力 N_4 的反向延长线与重力 mg 的夹角, ($^\circ$)。



a. 位置示意图
a. Location diagram



b. 受力分析
b. Force analysis diagram

注: O 为马铃薯的质心; O_1 和 O_2 为马铃薯与两辊之间的接触点; a_1 为 O 到 O_1 的直线距离, mm; b_1 为 O 到 O_2 的直线距离, mm; θ 为辊组倾斜角度, ($^\circ$); l 为清选辊与光辊的辊距, mm; d_2 为清选辊与光辊旋转中心的相对高度, mm; N_1 为清选辊对马铃薯的支持力, N; f_1 为清选辊对马铃薯的摩擦力, N; N_2 为光辊对马铃薯的支持力, N; f_2 为光辊对马铃薯的摩擦力, N; mg 为马铃薯自身的重力, N; α_1 为支持力 N_1 和 N_2 形成的夹角, ($^\circ$); β_1 为支持力 N_2 的反向延长线与重力形成的夹角, ($^\circ$)。

Note: O is the centroid of the potato, O_1 and O_2 are the contact points between potato and two rollers; a_1 is the straight-line distance from O to O_1 , mm; b_1 is the straight-line distance from O to O_2 , mm; θ is the inclination angle of the roller group, ($^\circ$); l is the roller distance between the cleaning roller and the smooth roller, mm; d_2 is the relative height of the cleaning roller and the smooth roller, mm; N_1 is the support force of the cleaning roller to the potato, N; f_1 is the friction force of the cleaning roller to the potato, N; N_2 is the smooth roller pair The supporting force of the potato, N; f_2 is the friction force of the smooth roller on the potato, N; mg is the gravity of the potato itself, N; α_1 is the angle formed by the supporting force N_1 and N_2 , ($^\circ$); β_1 is the angle formed by the reverse extension line of the supporting force N_2 and the gravity, ($^\circ$).

图 11 马铃薯翻过光辊的受力分析图

Fig.11 Force analysis diagram of potato turning over smooth roller

通过力学分析可知, 在清选过程中清选辊和光辊对马铃薯支持力之间的夹角 α_1 和 α_2 变化较小, 但重力 mg 与其中一支持力的负方向所形成的夹角 β_1 和 β_2 受装置倾角 θ 、清选辊与光辊的辊距 l 和两辊相对高度 d_2 的影响, 其大小不断变化。由式 (13) ~ (16) 可以看出, 夹角 β_1 和 β_2 过大或过小都会使马铃薯难以实现“越辊”运动, 堆积在两辊之间。此外, 在清选过程中上料量和两种辊的转速不同, 相邻马铃薯之间、马铃薯与两辊之间的撞击力和摩擦次数也不同, 从而导致清选效果不同。综合考虑, 将上料量、装置倾角、清选辊转速、光辊的转速、清选辊与光辊的辊距、两辊的相对高度作为试验因素进行交互试验, 并根据试验结果得到清选装置的最佳工作参数。

3 交互试验

3.1 试验设备与材料

目前, 为了保证收获机在田间作业时的稳定性, 装袋

型马铃薯联合收获机上的清选装置多为固定结构，其参数不可调节。为了测试各因素对清选效果的影响，搭建了多参数可调的清选装置试验台，用变频器调节上料斗的输送速度，用液压缸调节装置倾斜角度，手动操作流量阀并结合转速测量仪调节辊速，用机械方式调节清选辊和光辊的辊距和相对高度，同时清选装置下端安装有杂质输送带，后端安装有马铃薯输送带，试验台结构如图 12 所示。



a. 侧视图

a. Side view



b. 清选装置

b. Cleaning device

1. 马铃薯输送带 2. 清选装置 3. 杂质输送带

1. Potato conveyor belt 2. Cleaning device 3. Impurity conveyor belt

图 12 试验台架

Fig.12 Test bench

试验设备与仪器主要有马铃薯联合收获机清选装置试验台、秒表、转速测量仪、激光测距仪、角度测量仪、卷尺、电子秤、电子天平、收集箱等。试验时间为 2021 年 9 月，试验材料为山东省德州市乐陵市黄夹镇许家村当天机器收获的“希森 3 号”马铃薯，收获机器为无清选装置的装袋型马铃薯收获机。马铃薯三轴平均尺寸为 99.2、65.1 和 56.2 mm，平均含水率为 76.45%，单果质量 86.3~315 g，其中小于 100 g、100~300 g、大于 300 g 马铃薯占比分别为 9.2%、84.7%、6.1%。收获地块土壤类型为黏重土壤，土壤含水率为 16.2%，土壤容重 1.36 g/cm³。

3.2 评价指标

根据前文的力学分析并结合装袋型马铃薯联合收获机实际作业经验，选取对清选装置影响较大的上料量、装置倾角、清选辊转速、光辊转速、清选辊与光辊的辊距、两辊的相对高度为试验因素。参考 NY/T 648—2015《马铃薯收获机质量评价技术规范》和 DB15/T 1418—2018《马铃薯种薯智能仓储技术规程》，将伤薯率 Y_1 、破皮率 Y_2 、除杂率 Y_3 为试验指标^[11,23]，进行单因素和多因素试验。

每组试验前，利用电子秤将称好的马铃薯平铺到输送带上，由式 (17) 计算上料量 W ，杂质输送带尾端接有收集箱，收集清选出的杂质，清选后的马铃薯落到马铃薯输送带上。每次平行试验结束后，用电子秤分别称量输送带上马铃薯总质量 m_2 和收集箱内的杂质质量 m_5 ；人工筛选并称量损伤薯块 m_3 和破皮薯块 m_4 。其中破皮薯块采用椭圆面积公式计算马铃薯实际擦伤面积^[24]，用尺子测量后擦伤面积大于 0.2 cm² 的薯块视为破皮，伤及薯肉的薯块根据农户认可程度并结合组织变色判别为伤薯^[25-26]。经过多次试验，表皮完好的内损现象并未出现，因此可忽略不计。分别由式 (18)、(19)、(20) 计算伤薯率、破皮率和除杂率。

上料量^[27-28]：

$$W = c' \times v_2 \times m_1 \quad (17)$$

式中 W 为上料量，kg/s； c' 为输送带宽度，m； v_2 为输送带传动速度，m/s； m_1 为输送带中单位面积铺放马铃薯总质量，kg/m²。

$$\text{伤薯率:} \quad Y_1 = \frac{m_3}{m_2} \times 100\% \quad (18)$$

$$\text{破皮率:} \quad Y_2 = \frac{m_4}{m_2} \times 100\% \quad (19)$$

$$\text{除杂率:} \quad Y_3 = \frac{m_5}{m_2 + m_5} \times 100\% \quad (20)$$

式中 m_2 为作业后马铃薯总质量，kg； m_3 为作业后损伤薯质量，kg； m_4 为作业后破皮薯质量，kg； m_5 为杂质总质量，kg。

3.3 试验方案

参考现有机型的工作参数，并结合机构设计和单因素试验结果，确定上料量 4~8 kg/s、装置倾角 8~12°、清选辊转速 100~120 r/min、光辊转速 130~150 r/min、清选辊与光辊的辊距 10~20 mm、两辊相对高度 35~55 mm。应用 Design-Expert 10.0.3 进行六因素三水平二次回归正交试验，试验因素水平编码如表 3 所示，每组试验重复 3 次取平均值作为试验结果，试验方案与结果如表 4 所示。

3.4 结果与分析

根据表 4 试验结果，对伤薯率、破皮率、除杂率进行方差分析，去除不显著项，结果如表 5。得到有关伤薯率、破皮率、除杂率的回归方程如式 (21)~(23) 所示。

$$Y_1 = 1.05 + 0.21A - 0.073B - 0.21C - 0.095D + 0.094BE + 0.18BF + 0.19A^2 + 0.29B^2 + 0.15C^2 + 0.13D^2 + 0.17E^2 + 0.14F^2 \quad (21)$$

$$Y_2 = 0.63 + 0.11A - 0.062C - 0.065D + 0.053F + 0.083EF + 0.14B^2 + 0.14D^2 + 0.069E^2 + 0.16F^2 \quad (22)$$

$$Y_3 = 94.01 + 0.45B + 0.6C + 1.07D + 0.36E + 0.41F + 0.53CD + 0.5A^2 - 0.55B^2 + 0.5E^2 + 0.8F^2 \quad (23)$$

表 3 因素水平编码表

Table 3 Coding table of factors level

水平 Levels	上料量 Feeding rate/(kg·s ⁻¹)	装置倾角 Device inclination/(°)	清选辊转速 Cleaning roller speed/(r·min ⁻¹)	光辊转速 Smooth roller speed/(r·min ⁻¹)	辊距 Roller distance/mm	相对高度 Relative height/mm
-1	4	8	100	130	10	35
0	6	10	110	140	15	45
1	8	12	120	150	20	55

表 4 试验方案及结果
Table 4 Test scheme and results

试验编号 Test No.	A	B	C	D	E	F	Y ₁ /%	Y ₂ /%	Y ₃ /%
1	-1	-1	0	-1	0	0	1.73	0.95	92.3
2	1	-1	0	-1	0	0	2.12	1.17	91.8
3	-1	1	0	-1	0	0	1.51	0.83	92.8
4	1	1	0	-1	0	0	2.01	1.11	93.1
5	-1	-1	0	1	0	0	1.34	0.74	95.1
6	1	-1	0	1	0	0	1.66	0.91	95.5
7	-1	1	0	1	0	0	1.34	0.74	94.9
8	1	1	0	1	0	0	1.58	0.87	95.6
9	0	-1	-1	0	-1	0	1.69	0.93	92.9
10	0	1	-1	0	-1	0	1.61	0.89	93.4
11	0	-1	1	0	-1	0	1.63	0.64	93.1
12	0	1	1	0	-1	0	1.26	0.69	94.6
13	0	-1	-1	0	1	0	1.87	1.03	94.2
14	0	1	-1	0	1	0	2.06	1.13	94.3
15	0	-1	1	0	1	0	1.62	0.89	94.9
16	0	1	1	0	1	0	1.5	0.83	94.4
17	0	0	-1	-1	0	-1	1.77	0.97	93.4
18	0	0	1	-1	0	-1	1.57	0.86	94.4
19	0	0	-1	1	0	-1	1.53	0.84	93.6
20	0	0	1	1	0	-1	0.99	0.54	96.7
21	0	0	-1	-1	0	1	1.58	1.02	93.4
22	0	0	1	-1	0	1	1.18	1.11	94.3
23	0	0	-1	1	0	1	1.64	1.04	94.5
24	0	0	1	1	0	1	1.49	0.99	97.5
25	-1	0	0	-1	-1	0	1.55	0.85	93.2
26	1	0	0	-1	-1	0	1.85	1.02	93.9
27	-1	0	0	1	-1	0	1.39	0.76	95.2
28	1	0	0	1	-1	0	1.77	0.97	95.9
29	-1	0	0	-1	1	0	1.34	0.74	94.2
30	1	0	0	-1	1	0	1.59	0.87	94.6
31	-1	0	0	1	1	0	1.13	0.62	96.4
32	1	0	0	1	1	0	1.66	0.91	96.1
33	0	-1	0	0	-1	-1	2.08	1.04	92.7
34	0	1	0	0	-1	-1	1.24	1.08	94.7
35	0	-1	0	0	1	-1	2.01	0.87	93.5
36	0	1	0	0	1	-1	1.63	0.9	95.4
37	0	-1	0	0	-1	1	1.67	0.82	94.6
38	0	1	0	0	-1	1	1.53	0.94	96.7
39	0	-1	0	0	1	1	1.33	1.02	95.1
40	0	1	0	0	1	1	1.72	1.05	96.5
41	-1	0	-1	0	0	-1	1.17	0.64	94.5
42	1	0	-1	0	0	-1	1.68	0.92	94.9
43	-1	0	1	0	0	-1	1.29	0.71	95.5
44	1	0	1	0	0	-1	1.64	0.9	96.4
45	-1	0	-1	0	0	1	1.37	0.75	94.7
46	1	0	-1	0	0	1	2.07	1.14	95.9
47	-1	0	1	0	0	1	1.26	0.69	95.7
48	1	0	1	0	0	1	1.76	0.97	96.7
49	0	0	0	0	0	0	0.82	0.45	94.0
50	0	0	0	0	0	0	1.06	0.58	93.2
51	0	0	0	0	0	0	0.94	0.52	94.7
52	0	0	0	0	0	0	1.12	0.62	94.2
53	0	0	0	0	0	0	1.28	0.7	93.6
54	0	0	0	0	0	0	1.08	0.59	95.3

注: Y₁ 表示伤薯率, %; Y₂ 表示破皮率, %; Y₃ 表示除杂率, %。A~F 表示 a~f 的编码值。

Note: Y₁ is potato injury rate, %; Y₂ is skin breakage rate, %; Y₃ is impurity removal rate, %. A-F means code value of a-f.

由表 5 可知, 伤薯率、破皮率、除杂率模型 P 值均 <0.01 , 表明该回归模型非常显著。其决定系数 R^2 分别为 0.8458、0.7991、0.8479, 表明响应值变化可由模型 Y₁、Y₂、Y₃ 解释; 伤薯率、破皮率、除杂率模型失拟项 P 值分别为 0.5213、0.3819、0.7915, 均大于 0.05, 说明该试

验产生的误差很小, 模型合理, 可用模型 Y₁、Y₂、Y₃ 对伤薯率、破皮率、除杂率的变化趋势进行预测。

表 5 各指标方差分析

Table 5 Variance analysis of each indicators

试验指标 Test indexs	来源 Sources	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F 值 F value	P 值 P value
Y ₁	模型	3.92	12	12.26	<0.000 1
	A	1.03	1	38.65	<0.000 1
	B	0.13	1	4.85	0.033 4
	C	0.34	1	12.71	0.000 9
	D	0.22	1	8.13	0.006 8
	BE	0.14	1	5.35	0.025 8
	BF	0.27	1	10.14	0.002 8
	A ²	0.37	1	13.97	0.000 6
	B ²	0.88	1	32.99	<0.000 1
	C ²	0.22	1	8.33	0.006 2
	D ²	0.17	1	6.42	0.015 2
	E ²	0.28	1	10.64	0.002 2
	F ²	0.21	1	7.91	0.007 5
	残差	1.09	41		
	失拟项	0.97	36	1.09	0.521 3
	误差	0.12	5		
	总和	5.01	53		
Y ₂	模型	1.2	9	13.45	<0.000 1
	A	0.31	1	31.52	<0.000 1
	B	0.091	1	9.2	0.004 1
	D	0.1	1	10.35	0.002 4
	F	0.067	1	6.77	0.012 6
	EF	0.054	1	5.49	0.023 8
	B ²	0.21	1	21.5	<0.000 1
	D ²	0.22	1	21.66	<0.000 1
	D ²	0.051	1	5.11	0.028 8
	F ²	0.3	1	29.9	<0.000 1
	残差	0.44	44		
	失拟项	0.4	39	1.4	0.381 9
	误差	0.037	5		
	总和	1.64	53		
Y ₃	模型	66.73	10	16.7	<0.000 1
	B	4.77	1	11.94	0.001 2
	C	8.76	1	21.93	<0.000 1
	D	27.31	1	68.35	<0.000 1
	E	3.15	1	7.89	0.007 4
	F	4.08	1	10.22	0.002 6
	CD	2.21	1	5.52	0.023 5
	A ²	2.85	1	7.15	0.010 6
	B ²	3.26	1	8.17	0.006 5
	E ²	2.63	1	6.59	0.013 8
	F ²	9.33	1	23.35	<0.000 1
	残差	17.18	43		
	失拟项	14.32	38	0.66	0.791 5
	误差	2.85	5		
	总和	83.91	53		

注: $P<0.01$ 表示极显著, $P<0.05$ 表示显著。

Note: $P<0.01$ means extremely significant, $P<0.05$ means significant.

3.5 试验因素交互作用分析

由表 5 各指标方差分析表可知, 对伤薯率影响显著的交互项为 BE、BF, 对破皮率影响显著的交互项为 EF, 对除杂率影响显著的交互项为 CD, 各因素交互作用如图 13 所示。

图 13a 为其他因素固定在 0 水平时, 辊距与装置倾角

交互作用对伤薯率的影响。从图中可以看出,伤薯率随着清选辊与光辊辊距和装置倾角的增加呈先下降后上升的趋势。分析其原因为:当辊距较小时,两辊对马铃薯的支持力所形成的夹角较小,造成马铃薯在竖直方向的合力增大,马铃薯容易跃起形成二次损伤;当辊距较大时,马铃薯容易堆积在两辊之间,导致伤薯率增大。

图 13b 为两辊相对高度与装置倾角的交互作用对伤薯率的影响。当装置倾角一定时,随着两辊相对高度升高,伤薯率先降低后逐渐增大,这主要是因为两辊相对高度较小时,会增加马铃薯翻过清选辊下落到光辊的高度,使马铃薯与光辊的接触力增大,伤薯率增加。当两辊相对高度较大时,会导致马铃薯难以翻过光辊,堆积在两辊之间。在同一相对高度下伤薯率随装置倾角的增加先降低后升高,这是由于装置倾角的增大使马铃薯与辊子接触点的合力矩增加,翻过辊子更加容易,从而减少了马铃薯在清选装置上的运动时间,伤薯率降低。当装置倾角继续增加,相邻辊子的相对高度会逐渐增加,导致马铃薯在下落时所受到的冲击力增加,伤薯率升高。

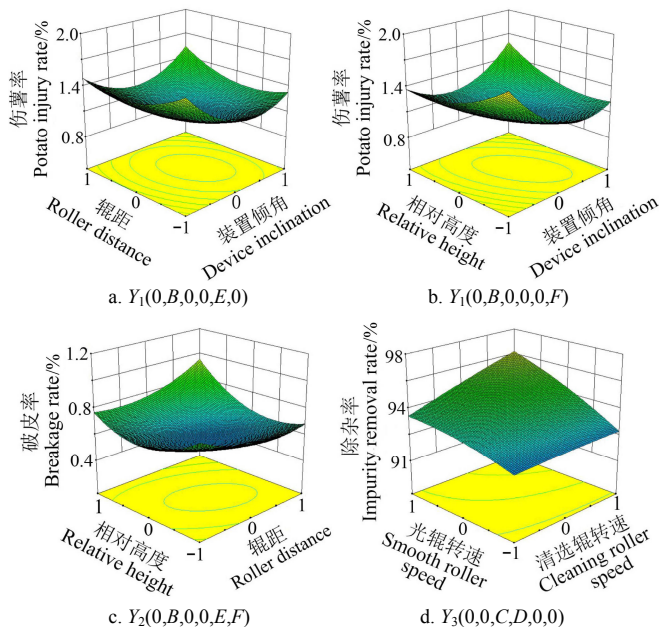


图 13 交互因素对各指标的影响

Fig.13 Influence of interactive factors on various index

图 13c 为两辊相对高度与辊距交互作用对破皮率的影响。破皮率随两辊相对高度的增加呈现先下降后上升的趋势,随清选辊与光辊辊距的增加呈现小幅度上升的趋势。破皮率受相对高度的影响较大,受清选辊与光辊辊距的影响较小。分析其原因为:两辊相对高度过大或过小会使马铃薯在两辊之间的接触面积增大,导致破皮率增大。

图 13d 为清选辊转速与光辊转速交互作用对除杂率的影响。从图中可以看出,当清选辊的转速和光辊的转速皆处于高水平时伤薯率达到最大值,这是因为随着两辊转速的增加,马铃薯在两辊之间的摩擦次数就会增加,使得杂质去除效果明显。

4 参数优化与验证

4.1 参数优化

为实现清选装置最佳的收获性能,利用 Design-Expert10.0.3 软件进行参数优化,其目标函数以及目标约束与变量区间如式(24)所示。

通过 Design-Expert10.0.3 对各参数进行多目标优化求解,得到优化结果为:上料量 4.3 kg/s、装置倾角 10.3°、清选辊转速 119 r/min、光辊转速 148 r/min、清选辊和光辊的辊距 16.8 mm、两辊相对高度 40.5 mm,对应的伤薯率为 1.06%、破皮率为 0.54%、除杂率为 96.15%。

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ \max Y_3 \\ -1 \leq A, B, C, D, E, F \leq 1 \\ 0 \leq Y_1 \leq 2\% \\ 0 \leq Y_2 \leq 4\% \\ 95\% \leq Y_3 \end{cases} \quad (24)$$

4.2 试验验证

为了验证各指标模型预测的准确性及清选装置最优参数组合条件下整机的作业质量,于 2021 年 9 月在山东省德州市乐陵市黄夹镇许家村进行验证试验。试验田种植的马铃薯品种为“希森 3 号”,土壤类型为黏重土壤,土壤含水率为 16.2%,土壤容重 1.36 g/cm³,0~15 cm 土壤坚实度为 0.49 MPa,15~30 cm 土壤坚实度为 0.84 MPa,试验现场如图 14 所示。



图 14 田间试验

Fig.14 Field test

设计 3 组平行试验,试验结果如表 6 所示。在最优参数组合条件下,模型验证试验伤薯率为 1.10%,破皮率为 0.55%,除杂率为 95.04%,各评价指标与其模型预测值的相对误差分别为 3.80%、1.90%和 1.20%,均小于 5%,参数优化结果可靠,且各指标均符合相关规定^[29-30]。

表 6 参数优化组合试验结果

Table 6 Test results of optimized parameter combination

项目 Items	伤薯率 Potato injury rate/%	破皮率 Breakage rate /%	除杂率 Impurity removal rate/%
模型预测值 Predicted value of model	1.06	0.54	96.15
验证试验值 Value of validation test	1.10	0.55	95.04
相对误差 Relative error	3.80	1.90	1.20

5 结 论

为了解决黏重土壤条件下马铃薯联合收获机在收获时出现的清选不干净、薯土分离不彻底等问题,本文设计了一种适用于装袋型马铃薯联合收获机的清选装置。

该装置采用清选辊与光辊交替排列的形式,两辊差速转动,通过“揉搓”的形式去除粘附在马铃薯表面的泥土和掺杂在混合物中的杂草、薯秧等细小杂质。

1) 通过台架试验,利用 Box-Behnken 试验方案以上料量、装置倾角、清选辊转速、光辊转速、清选辊与光辊的辊距、两辊相对高度为影响因素,以伤薯率、破皮率及除杂率为评价指标,进行六因素三水平正交试验。通过方差分析和响应面分析,剔除不显著项,建立了装袋型马铃薯联合收获机清选装置参数优化模型,得到了最优参数组合:上料量 4.3 kg/s、装置倾角 10.3°、清选辊转速 119 r/min、光辊转速 148 r/min、清选辊和光辊的辊距 16.8 mm、两辊相对高度 40.5 mm,对应的伤薯率为 1.06%、破皮率为 0.54%、除杂率为 96.15%。

2) 对最优参数组合进行了田间验证试验,田间验证试验结果为:伤薯率为 1.10%、破皮率为 0.55%、除杂率为 95.04%,各指标与模型预测值的相对误差均小于 5%,作业效果符合相关规定。

[参 考 文 献]

- [1] 杨雅伦,郭燕枝,孙君茂.我国马铃薯产业发展现状及未来展望[J].中国农业科技导报,2017,19(1):29-36.
Yang Yalun, Guo Yanzhi, Sun Junmao. Present status and future prospect for potato industry in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(1): 29-36. (in Chinese with English abstract)
- [2] 宁启文,胡乐鸣.中国农业年鉴[Z].北京:中国农业年鉴编辑部,2018.
- [3] 卓会敏,付三泽,刘恒,等.我国马铃薯产业标准现状分析及建议[J].安徽农业科学,2019,47(21):248-250,270.
Zhuo Huimin, Fu Sanze, Liu Heng, et al. Analyses and suggestions on current situation of potato industry standards in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(21): 248-250, 270. (in Chinese with English abstract)
- [4] 吕金庆,孙贺,兑瀚,等.粘重土壤条件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):9-15.
Lv 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): 9-15. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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, Lv 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 with English abstract)
- [6] 刘崇林,胡军,赵胜雪,等.马铃薯收获机具研究进展[J].中国农机化学报,2019,40(4):31-35,124.
Liu Chonglin, Hu Jun, Zhao Shengxue, et al. Research progress on potato harvesting equipments [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 31-35, 124. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赵庆亮.国内外马铃薯收获机械研究现状及发展展望[J].农业工程,2020,10(6):7-10.
Zhao Qingliang. Research status and development prospect of potato harvesting machinery at home and abroad[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(6): 7-10. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吕金庆,王鹏榕,刘志峰,等.马铃薯收获机分离装置的现状与展望[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,2019:149-154.
- [9] 张子瑞,刘贵明,李禹红.国内外甘薯收获机械发展概况[J].农业工程,2015,5(3):13-15,18.
Zhang Zirui, Liu Guiming, Li Yuhong. Development situation of sweet potato harvester at home and abroad[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(3): 13-15, 18. (in Chinese with English abstract)
- [10] 宋言明,王芬娥.新型马铃薯联合收获机的总体设计[J].甘肃农业大学学报,2009,44(1):151-154.
Song Yanming, Wang Fene. Overall design of a new potato combine harvester[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2009, 44(1): 151-154. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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.
Lv Jinqing, Du Changlin, Liu Zhongyuan, et al. Design and test of impurity removal device of potato receiving hopper[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery. 2021, 52(01): 82-90, 61. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(17): 9-17. (in Chinese with English abstract)
- [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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(11): 26-33. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘洪芹.马铃薯机械化杀秧及收获技术详述[J].农民致富之友,2019(11):25.
- [15] 孙景彬,李学强,王相友.马铃薯杀秧机的优化设计与分析[J].农机化研究,2017,39(7):83-88.
Sun Jingbin, Li Xueqiang, Wang Xiangyou. Optimization design and analysis of potato seedling cutter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(7): 83-88. (in Chinese with English abstract)
- [16] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(下)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [17] 哈尔滨工业大学理论力学教研室.理论力学(I)[M].北京:高等教育出版社,2016.
- [18] 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 with English abstract)
- [19] 叶玉驹,焦永和,张彤.机械制图手册[M].北京:机械工业出版社,2012.

- [20] 王相友, 祝珊, 李学强. 定向排列纵横切分马铃薯种薯切块机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 334-345. Wang Xiangyou, Zhu Shan, Li Xueqiang. Design and experiment of directional arrangement vertical and horizontal cutting of seed potato cutter [J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery. 2020, 51(6): 334-345. (in Chinese with English abstract)
- [21] 吕金庆, 于佳钰, 冯雪. 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. Lv Jinqing, Yu Jiayu, Feng Xue, et al. Design and experiment of roller potato grading machine [J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery. 2019, 50(2): 323-332. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张恒. 马铃薯干式低损清选分级机的设计与清选试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018. Zhang Heng. Design and Cleaning Test of Dry and Low Damage Sorting Machine for Potato [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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 with English abstract)
- [24] 卢琦. 马铃薯损伤机理试验研究及联合收获机设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. Lu Qi. Experimental Research on Damage Mechanism of Potato and Combine Harvester Designed [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [25] 冯斌, 孙伟, 孙步功, 等. 收获期马铃薯块茎跌落冲击特性及损伤规律研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 267-274. Feng Bin, Sun Wei, Sun Bugong, et al. A study on dropping impact characteristics and damage regularity of potato tubers during harvest [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 267-274. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张建华. 马铃薯块茎损伤评价技术研究及损伤变色性状的遗传分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008. Zhang Jianhua. Assessment Technology and Genetic Analysis for Tuber Browning in Potato (*Solanum Tuberosum*) [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘元元, 刘卉, 尹彦鑫, 等. 基于功率监测的联合收割机喂入量预测方法[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(11): 157-163. Liu Yuanyuan, Liu Hui, Yin Yanxin, et al. Feeding assessment method for combine harvester based on power measurement [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(11): 157-163. (in English with Chinese abstract)
- [28] 陈度, 王书茂, 康峰, 等. 联合收割机喂入量与收获过程损失模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 18-21. Chen Du, Wang Shumao, Kang Feng, et al. Mathematical model of feeding rate and processing loss for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 18-21. (in English with Chinese abstract)
- [29] 中华人民共和国农业部. 马铃薯收获机质量评价技术规范: NY/T 648—2015[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [30] 中华人民共和国农业部. 马铃薯种薯智能仓储技术规程: DB15/T 1418—2018[S]. 北京: 中国农业出版社, 2018.

Design and parameter optimization of the cleaning device for a bagged potato combine harvester

Wang Xiangyou^{1,2}, Lyu Danyang¹, Ren Jiayi¹, Zhang Meng^{2,3}, Meng Pengxiang^{2,3}, Li Xueqiang^{2,3}

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China;

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

3. Shandong Star Agricultural Equipment Co., Ltd., Dezhou 253600, China)

Abstract: In response to the problems of low impurity removal rate, high potato injury rate, and high breakage rate of the existing potato combine harvester cleaning device, this study designed a cleaning device based on a bagged potato combine harvester for viscous soil conditions. The two rollers rotated at different speeds to clean potatoes by rubbing. Box-Behnken response surface experimental design theory was used to conduct an orthogonal test. The feeding volume, device inclination, cleaning roller speed, smooth roller speed, roller distance, and relative height were selected as the testing factors. The potato injury rate, breakage rate, and impurity removal rate were selected as the evaluation indexes. The regression mathematical model between each influencing factor and index was established, and the interaction effect of each factor on the response value was analyzed. At the same time, the model was comprehensively optimized. When the feeding rate was 4.3 kg/s, the device inclination angle was 10.3°, the cleaning roller speed was 119 r/min, the smooth roller speed was 148 r/min, the roller distance was 16.8 mm, the relative height was 40.5 mm, the potato injury rate was 1.06%, breakage rate was 0.54%, and impurity removal rate was 96.15% respectively. Field verification tests were conducted on the optimized results. Under the combination of optimal parameters, the potato injury rate was 1.10%, the breakage rate was 0.55% and the impurity removal rate was 95.04%. All evaluation indexes were close to the predicted values and met the operational performance requirements of potato combine harvesters. The study is beneficial to the structural improvement and operation parameters optimization of the cleaning device for potato combine harvester.

Keywords: agricultural machinery; design; experiment; potato combine harvester; cleaning device; sticky soil