doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.033

装袋型马铃薯联合收获机不停机卸袋装置设计与试验

杨德秋[1,2]　程子文[1,2]　李　洋[1,2]　刘萌萌[1,2]　汪　昕[1,2]　陈新予[1,2]
陶鑫愿[1,2]　李道义[1]　张丽娜[1]
(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对装袋型马铃薯联合收获机田间作业时停机卸袋所造成的效率较低问题,设计了一种不停机卸袋装置。该装置可通过缓存和装袋状态的切换,实现机器作业过程不停机卸袋。运用 Hertz 接触理论推导马铃薯与薯箱碰撞过程中最大接触应力的表达式,得到了影响接触应力的关键因素。对卸袋装置卸袋过程进行了分析,确定了卸袋装置的尺寸参数;通过速度矢量图对马铃薯在与箱壁碰撞后可能出现的 3 种运动方向进行了分析;结合运动学原理明确了马铃薯在下落过程中的运动轨迹和速度表达式,得出影响马铃薯速度的关键因素。为确定箱体的最佳结构参数,运用 Box－Benhnken 试验方法,以壁面角度、输送带速度和箱体壁面长度为试验因素,以马铃薯破皮率和伤薯率为试验指标,对该装置进行三因素三水平试验。通过 Design-Expert 11.1.0 软件对试验结果进行方差分析,得出对试验指标影响显著的因素,通过响应面试验,分析试验交互因素对试验指标的影响规律并得出最佳的结构参数,在此基础上进行台架试验验证,并进行了田间对比试验。台架试验表明,当薯箱壁面角度为 44°、分拣输送链速度为 0.44 m/s、薯箱壁面长度为 603 mm 时,破皮率为 0.96%,伤薯率为 0.63%。田间对比试验结果表明,满足马铃薯联合收获机作业标准要求,且收获效率较停机卸袋联合收获机提升了 41.63%。

关键词: 马铃薯联合收获机; 不停机卸袋装置; Hertz 接触理论; 碰撞损伤
中图分类号: S225.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)06-0351-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Non-stop Unloading Device for Bagging Potato Combine Harvester

YANG Deqiu[1,2]　CHENG Ziwen[1,2]　LI Yang[1,2]　LIU Mengmeng[1,2]　WANG Xin[1,2]　CHEN Xinyu[1,2]
TAO Xinyuan[1,2]　LI Daoyi[1]　ZHANG Li'na[1]
(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of low efficiency caused by stoppage unloading during field operation of bagging potato combine, a non-stoppage unloading device was designed. The device can switch between caching and bagging status, and achieve non-stop unloading during the machine operation process. The expression of the maximum contact stress during the collision between potato and potato box was derived by using Hertz contact theory, and the key factors affecting the contact stress were obtained. An analysis was conducted on the unloading process of the unloading device, and the size parameters of the unloading device were determined. Three possible motion directions of the potato after collision with the wall of the box were analyzed by the velocity vector diagram. Based on the principle of kinematics, the trajectory and velocity expression of potato in the falling process were defined, and the key factors affecting the potato speed were obtained. In order to determine the best structural parameters of the box, Box－Benhnken test method was used to carry out three-factor and three-level tests on the device with wall angle, conveyor belt speed and box wall length as test factors and potato peel breakage rate and potato damage rate as test indexes. Analysis of variance was performed on the test results through Design-Expert 11.1.0 software to identify the factors that had a significant impact on the experimental indicators, and the rule of influence of experimental interaction factors on test indicators was analyzed through

收稿日期: 2024－03－27　修回日期: 2024－05－10
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS－09－P25)
作者简介: 杨德秋(1974—),男,研究员,主要从事马铃薯生产全程机械化装备技术研究,E-mail: yangdq@maen.com.cn

response surface tests, and the optimal structural parameters were obtained. On this basis, experimental verification was carried out, and field comparison experiments were conducted. The bench test showed that when the wall angle of the potato box was 44°, the sorting and conveying chain speed was 0.44 m/s, and the wall length of the potato box was 603 mm, the breaking rate was 0.96% and the damaged rate was 0.63%. The results of field comparative experiment showed that the obtained data met the operational requirements of the potato combine harvester and the harvesting efficiency was improved by 41.63% compared with that of shutdown unloading combine harvester.

Key words: potato combine harvester; non-stop bag unloading device; Hertz contact theory; collision damage

0 引言

受发展水平和立地条件的影响,国内马铃薯收获多采用分段收获的方式[1],效率低、分段收获后人工捡拾成本高、劳动强度大。而马铃薯联合收获机可一次性完成收获、除杂、升运、集薯等工序,提高收获效率的同时也极大地降低了人工成本,是今后发展的重要方向[2-3]。在国外大工业化即时加工的处理方式对鲜薯收获的损伤率要求不高的背景下,采用升运装车的后端处理模式的马铃薯联合收获机既能达到较高的收获效率又能满足马铃薯收获的各项指标,而国内对于马铃薯鲜食鲜贮的需求,使得损伤率成为评价马铃薯联合收获机的重要指标之一[4-7]。在当前国内马铃薯收获发展阶段和收获模式的背景下,装袋型马铃薯联合收获机采用升运装袋的方式满足农户要求的同时方便后续对马铃薯进行集中运输和仓储。但由于国内北方一季作区收获季较短,收获期易发生气温骤降引起霜冻,因马铃薯不及时收获容易造成马铃薯冻伤从而形成不必要损失的现象时有发生,因此亟需研发一种不停机卸袋装置,提高马铃薯联合收获机的作业效率。

国外对马铃薯联合收获机研究较早,已完全实现马铃薯收获的机械化,且机电液一体化控制技术较为成熟[3]。国外大型马铃薯联合收获机的卸袋方式则多采用侧输出升运装车。如 GRIMME 的 GT170、DOUBLEL 973 等采用边收获边升运的工作方式,但工作过程需运输车跟随作业,增加了收获成本;GRIMME 公司的 SE 系列、EVO 系列,AVR 公司的 Puma 系列等则在机身上安装有料斗,经过挖掘、输送、薯杂分离后的马铃薯进入缓存料斗中,当料斗内的马铃薯达到一定存量时,通过料斗底部的传送带装置将马铃薯侧输出到运输车内。

近年来,国内研究团队对装袋型马铃薯联合收获机的研究有所进展,但对于集薯卸袋装置的研究成果较少。李学强等[4]研究的装袋型马铃薯联合收获机充分利用整机空间,将集薯箱布置在挖掘部件上方,并通过二级输送装置将集薯箱与装袋装置连接在一起,实现马铃薯联合收获机集薯装袋功能。魏忠彩等[5]研究的 4UL-2 型马铃薯联合收获机后端的集薯装包卸包机构,在缓存料斗中增加覆盖有海绵聚氨酯材料的缓冲辊,该辊可有效吸收碰撞冲击能从而减轻马铃薯因碰撞冲击、摩擦等造成的损伤。杨德秋等[6-7]针对马铃薯分段收获后人工捡拾劳动强度大等问题,设计了一种自走式马铃薯捡拾装袋机,通过 DEM-MBD 耦合仿真,结合田间试验得出机器的最优工作参数,但在卸袋过程中需要停机作业,降低了捡拾效率。

为提高马铃薯联合收获机作业效率,降低马铃薯在装袋过程中受到的损伤,通过分析薯块在不停机卸袋装置上不同阶段的碰撞情况和运动轨迹,及卸袋装置在工作过程中的受力情况,设计一种不停机卸袋装置,通过试验确定最佳的结构和工作参数,最后通过田间试验验证薯块损伤情况和机器工作效率的提升效果。

1 不停机卸袋装置总体结构与工作原理

1.1 总体结构

不停机卸袋装置总体结构如图 1 所示,该装置主要由分拣输送链、集薯箱、踏板、升降料斗、平移液压缸、挡薯板、升降液压缸、导轨、机架、动滑轮等组成,主要技术参数如表 1 所示。

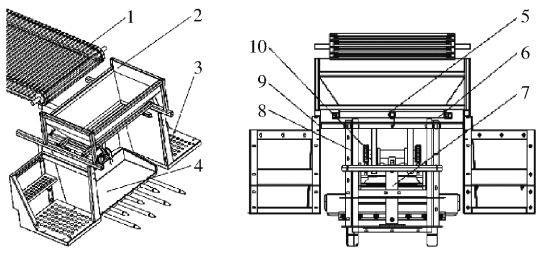


图 1 不停机卸袋装置结构图

Fig. 1 Structural diagram of non-stop unloading device

1. 分拣输送链 2. 集薯箱 3. 踏板 4. 升降料斗 5. 平移液压缸 6. 挡薯板 7. 升降液压缸 8. 导轨 9. 机架 10. 动滑轮

1.2 工作原理

马铃薯联合收获机作业前,升降液压缸驱动升降料斗到达最高点。收获过程中,经过挖掘、薯杂分

表 1　不停机卸袋装置参数

Tab. 1　Structural parameters of non-stop unloading device

参数	数值
装置尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 900×1 370×1 200
装置质量/kg	534
分拣输送链速度/(m·s^{-1})	0~1.2
升降料斗行程/mm	1 126
集薯箱容积/m^3	0.405

离后的马铃薯被输送至分拣输送链,经人工挑拣出未能分离的石块、秧蔓等杂物后,在分拣输送链的尾部落入不停机卸袋装置的集薯箱,经过集薯箱缓冲后落入提前挂好的吨包袋中,根据吨包袋中薯堆的高度调节升降料斗位置,从而保证马铃薯的跌落高度不会损伤薯块[8]。当升降料斗由最高点下降指定距离时,平移液压缸驱动挡薯板移动将集薯箱下端出料口封住,此时,马铃薯落入集薯箱内缓存,升降料斗移动到底部时,导轨底部的斜角设计使得吨包升降料斗倾斜,吨包袋在重力和摩擦力的作用下滑至地面。更换吨包袋后,移动挡薯板,使得马铃薯落入新的吨包袋中,从而实现不停机卸袋作业。

2　马铃薯碰撞损伤分析

马铃薯属于粘弹体,受到碰撞或冲击时,马铃薯经历由弹性变形到塑性变形的过程,其中塑性变形是碰撞过程中能量损失的重要原因之一,也使得马铃薯产生现时损伤和延时损伤[9-10]。马铃薯与碰撞体的碰撞为非完全弹性碰撞,碰撞恢复系数为 e $(0<e<1)$,根据弹性力学,在任何短暂的碰撞过程中,与相碰撞物体间巨大的内力相比,外力的冲量可忽略[11]。马铃薯碰撞过程符合动量公式

$$mv_1 - mv_2 = \int_{t_1}^{t_2} F(t)\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中　m——单个薯块质量,kg

v_1、v_2——薯块碰撞开始、结束时速度,m/s

t_1、t_2——薯块碰撞开始、结束时间,s

$F(t)$——t 时刻碰撞力,N

由于每次碰撞持续时间只有几毫秒,根据式(1)可知,碰撞过程中的力峰值较大,容易造成马铃薯形成现时损伤[12]。马铃薯碰撞过程中,动能先转化为形变势能,再由形变势能转变为动能,因此动能越大所转化的形变势能越大,马铃薯就越容易损伤。

有研究表明,马铃薯跌落碰撞过程中,宏观上将马铃薯视为粘弹体和弹性体所产生的碰撞响应规律一致,且响应参数值相差不大[12]。在进行理论推导过程中,将马铃薯在弹性形变阶段视为各向同性的弹性体,认为接触面是理想光滑面,忽略接触表面的摩擦力且不考虑流体动压效应,研究法向接触问题,根据 Hertz 接触理论[13-17],在接触半径为 b 的圆形接触区内,马铃薯与碰撞体接触如图 2 所示,碰撞接触区应力分布函数 $P(r_b)$ 的表达式为

$$P(r_b) = P\sqrt{1-\frac{r_b^2}{b^2}} \qquad (r_b \leqslant b) \tag{2}$$

式中　P——接触中心应力,MPa

r_b——与接触中心距离,mm

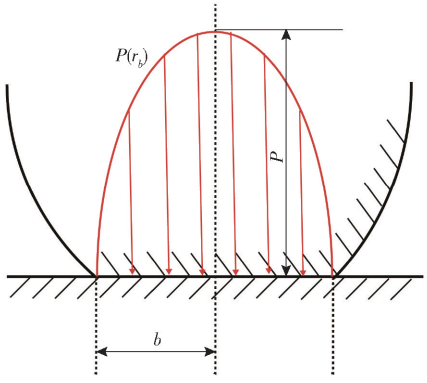


图 2　碰撞接触示意图

Fig. 2　Schematic of contact collision

压力 F 与接触中心应力 P、接触半径 b 之间的关系满足

$$F = \int_0^b P(r_b)2\pi r_b \mathrm{d}r_b = \frac{2}{3}P\pi b^2 \tag{3}$$

接触面法向位移和接触面半径满足

$$\begin{cases} b = \dfrac{\pi P R^*}{2E^*} \\ \delta = \dfrac{b^2}{R^*} \end{cases} \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} \dfrac{1}{R^*} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} \\ \dfrac{1}{E^*} = \dfrac{1-\nu_1^2}{E_1} + \dfrac{1-\nu_2^2}{E_2} \end{cases}$$

式中　δ——薯块和碰撞体接触中心的压缩位移,m

R^*——当量半径,m

E^*——当量弹性模量,MPa

R_1、R_2——薯块和碰撞体在接触区域的曲率半径,m

E_1、E_2——薯块与碰撞体材料的弹性模量,MPa

ν_1、ν_2——薯块与碰撞体材料的泊松比

由式(3)、(4)得弹性阶段压力与压缩位移之间的关系为

$$F(\delta) = \frac{4}{3}\sqrt{R^*}E^*\delta^{\frac{3}{2}} \tag{5}$$

设马铃薯与碰撞板碰撞的法向速度为 v_n,此时

$$F(\delta) = -ma = -m\frac{\mathrm{d}v_n}{\mathrm{d}t} = -m\frac{\mathrm{d}^2\delta}{\mathrm{d}t^2} = \frac{4}{3}\sqrt{R^*}E^*\delta^{\frac{3}{2}} \tag{6}$$

式中 a——马铃薯碰撞加速度,m/s^2

对 δ 进行积分可得

$$\frac{1}{2}\left[v_{n0}^2 - \left(\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}\right)^2\right] = \frac{8}{15m}\sqrt{R^*}E^*\delta^{\frac{5}{2}} \tag{7}$$

式中 v_{n0}——$t=0$ 时刻,马铃薯与碰撞体的相对法向速度,m/s

当达到最大变形量 δ^* 时,$\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t}=0$,则由式(7)可得

$$\delta^* = \left(\frac{15mv_{n0}^2}{16\sqrt{R^*}E^*}\right)^{\frac{2}{5}} \tag{8}$$

由式(5)、(8)可得,最大压力 F^* 为

$$F^* = \frac{4}{3}\left(\frac{15mE^{*\frac{2}{3}}R^{*\frac{1}{3}}v_{n0}^2}{16}\right)^{\frac{3}{5}} \tag{9}$$

当马铃薯进入塑性变形阶段,即接触中心应力 P 到达马铃薯单向压缩下的强度极限 σ_0 时,将会使马铃薯出现现时损伤,因此马铃薯发生损伤的临界状态为 $P=\sigma_0$,此时 $\delta=\delta^*$,$F=F^*$,由式(3)、(4)、(9)可得最大接触应力 P^* 为

$$P^* = \frac{2}{\pi R^{*\frac{3}{5}}}\left(\frac{15mv_{n0}^2}{16}\right)^{\frac{1}{5}}E^{*\frac{4}{5}} \tag{10}$$

当碰撞体为平面时,R_2 可认为是一个无限大的值,此时 $R^*=R_1$,代入式(9)、(10)中,可得马铃薯下落过程与箱壁碰撞的最大接触应力表达式。由式(10)可知,马铃薯与碰撞体碰撞的最大接触应力与自身质量、碰撞体材料和碰撞时相对法向速度成正比,与接触面当量半径成反比。

3 关键装置设计

3.1 卸袋装置

卸袋装置结构如图 3 所示,主要由升降料斗、滑块、滚子链、导轨、动滑轮及升降液压缸组成,其中滑块上的滑轮、动滑轮和滚子链均以升降液压缸为中心对称布置。卸袋机构作为不停机卸袋装置的关键部件之一,实现吨包袋的升降,而卸袋装置的结构设计是影响集薯箱尺寸参数设计的重要因素。

选取动滑轮作为中间机构,使得升降料斗在竖直方向的位移 H_1 与升降液压缸伸缩杆的伸长量 H_2 满足 $2H_2=H_1$。为明确卸袋机构在工作过程中滚子链所受力的大小,从而为液压缸的选型提供理论依据,对卸袋机构工作过程进行受力分析,其受力简图如图 4 所示。

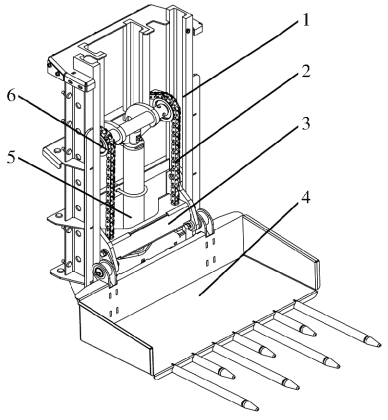


图 3 卸袋装置结构图

Fig. 3 Structural diagram of unloading device

1. 导轨 2. 滚子链 3. 滑块 4. 升降料斗 5. 升降液压缸 6. 动滑轮

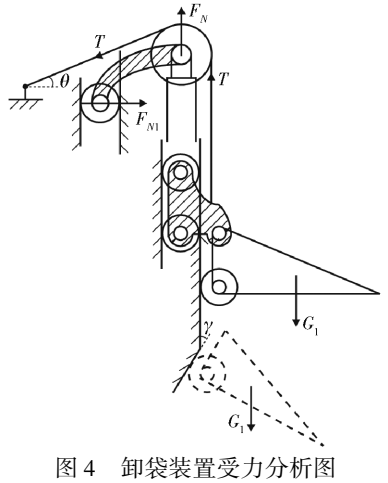


图 4 卸袋装置受力分析图

Fig. 4 Unloading device force diagram

在分析过程中不考虑滑轮与导轨之间的滚动摩擦,设升降料斗和其上吨包袋中马铃薯重力和为 G_1,则

$$\begin{cases} F_N = 2T + 2T\sin\theta \\ 2F_{N1} = 2T\cos\theta \end{cases} \tag{11}$$

式中 T——滚子链拉力,N

F_N——升降液压缸所需提供的力,N

F_{N1}——压缸滑轮受导轨的支持力,N

θ——滚子链左端与水平方向夹角,(°)

由式(11)可知液压缸所提供的力与滚子链的拉力及滚子链与水平方向夹角有关。θ 随着升降液压缸活塞杆的伸长变大,随着活塞杆缩短而变小,且 $0°<\theta<90°$,在重力和 G_1 时,F_N 随 θ 增大而增大,随 θ 减小而减小。当升降料斗在竖直段导轨上运动时,单根滚子链的拉力 T_1 满足 $2T_1=G_1$;当升降料斗到达底端斜角导轨段时,对滑块、升降料斗部分进行受力分析,受力简图如图 5 所示。

O_1、O_2、O_3 轮大小相等,半径为 r,为方便分析,认为此时马铃薯吨包袋在升降料斗上保持极限静止

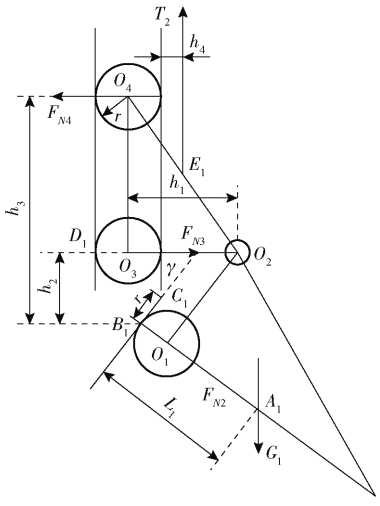


图 5　滑块、升降料斗受力简图

Fig. 5　Schematic of force on sliding block and potato block lifting platform

状态，则

$$\begin{cases} F_{N4} = F_{N3} + F_{N2}\cos\gamma \\ 2T_2 = G_1 + 2F_{N2}\sin\gamma \\ \sum M_{B_1}(F_R) = \dfrac{G_1 L_1 \cos\gamma}{2} + F_{N3}h_2 - \\ \quad T_2(h_4 + r\sin\gamma) - F_{N4}h_3 = 0 \\ \sum M_{O_3}(F_R) = F_{N4}(h_3 - h_2) - \left(\dfrac{G_1}{2} + F_{N2}\sin\gamma\right)h_1 + \\ \quad T_2(h_4 + r) = 0 \end{cases} \tag{12}$$

式中　F_{N2}、F_{N3}、F_{N4}——导轨对 3 个滑轮的支持力，N

γ——导轨斜角段与竖直方向夹角，(°)

T_2——斜角导轨段单根滚子链的拉力，N

$\sum M_{B_1}(F_R)$——以滑块、升降料斗为整体的平面力系在点 B_1 的力矩和，N·m

$\sum M_{O3}(F_R)$——以滑块为整体的平面力系在点 O_3 的力矩和，N·m

h_1——O_3 与 O_2 之间水平方向距离，取 101 mm

h_2——B_1 与 D_1 之间竖直方向距离，取 170 mm

h_3——B_1 与 O_4 之间竖直方向距离，取 380 mm

h_4——滚子链点 E_1 与导轨 C_1 之间水平方向距离，取 60 mm

L_1——A_1 与 B_1 之间距离，m

r——滑轮半径，即 B_1 与 C_1 之间距离，取80 mm

由式(12)可得，此时单根滚子链的拉力为

$$T_2 = \frac{G_1}{2}\frac{L_1\cos\gamma + h_2\cot\gamma}{h_2\cot\gamma + h_1 + r\sin\gamma - r} \tag{13}$$

对比式(11)、(12)可知，滚子链拉力在导轨斜角段时较大，且在转角处会出现突变。T_2 会随着卸袋的进行而增大，待吨包袋与地面接触面积增大后再减小。γ 过大时会出现吨包袋卸在地面上时出现吨包袋倾斜倒地的情况，过小则导致卸袋不顺畅，经过前期试验，γ 取 30°时，吨包袋可平稳落地。考虑发动机与分拣输送链的位置关系，设计分拣输送链下端与地面的距离 L_2 为 2 120 mm。吨包袋尺寸为 900 mm×900 mm×1 100 mm，为保证升降料斗到达斜角导轨时，吨包袋能够完全展开，集薯箱下端出料口到斜角导轨的距离 L_3 需满足 $L_3 > 1\,100$ mm，升降料斗尺寸需能够装下吨包袋，因此升降料斗的长 L_4、宽都取 1 000 mm，应在满足卸袋预期的情况下设计集薯箱，卸袋机构的尺寸参数简图如图 6 所示。

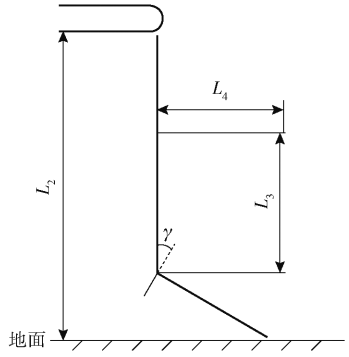


图 6　卸袋机构尺寸简图

Fig. 6　Dimensional diagram of unloading structure

综合上述分析可知，L_1 取最大值 1 000 mm、$G_1 = 10\,486$ N，液压缸行程为 600 mm。结合式(11)、(13)，当料斗到达底部时，取 $F_N = 2T_2$，按选取液压缸工作时的工作压力 P_g 为 16 MPa，取液压缸的负荷率 η 为 80%，代入数值计算可得液压缸的缸径 $D_C = \sqrt{\dfrac{4nF_N}{\pi\eta P_g}} \approx 82.55$ mm，根据液压缸尺寸参照表，取 $D_C = 90$ mm，按照工作压力选取液压缸活塞杆杆径为 $d = 0.7D_C = 63$ mm，根据液压缸尺寸参照表，取 $d = 63$ mm。

3.2　集薯装置设计

集薯箱在马铃薯联合收获机不停机卸袋作业过程中起关键性作用，保证机组能够在收获作业过程不停机的情况下进行卸袋和更换吨包袋。

如图 7 所示，集薯箱主要由外部金属材料和内部柔性材料构成，马铃薯在下落过程中首先与集薯箱内壁发生碰撞，碰撞后其运动状态发生突变，最终落入吨包袋中或在集薯箱中缓存。因此，通过对薯箱内马铃薯的运动学进行分析从而确定其基本结构和相关参数。

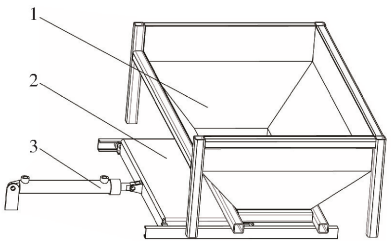


图 7 集薯装置结构图

Fig. 7 Structure diagram of potato collection box

1. 集薯箱 2. 挡薯板 3. 平移液压缸

3.2.1 装包过程马铃薯运动学分析

薯块的运动过程如图 8 所示,以重力的负方向为 Y 轴正方向,马铃薯在输送链上的平抛方向为 X 轴正方向,以薯块质心为原点建立坐标系,并将薯块的复杂运动简化为质点的运动,运动过程中忽略空气阻力作用[18]。机器作业时,分拣输送链以 v_0 的初速度将马铃薯从点 O 抛出,以抛物线的形式下落并以速度 v_B 在点 B 与箱壁碰撞,经过壁面柔性材料对法向冲击能量的吸收后,马铃薯滑落至出料口点 C,最后在重力加速度的作用下落入吨包袋点 D。

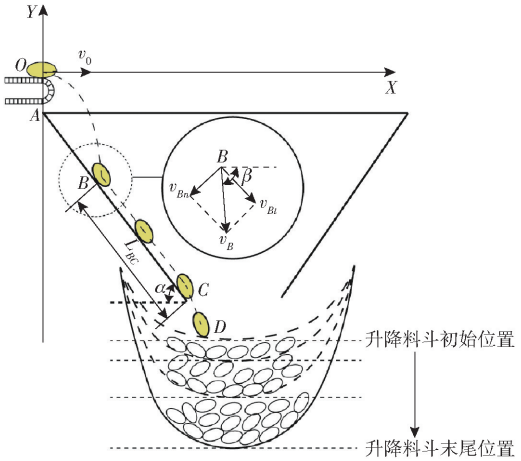


图 8 装包过程中薯块碰撞运动简图

Fig. 8 Diagram of collision motion of potato chunks during packaging process

由于碰撞瞬间的内力远大于其它外力,此时摩擦力、重力等外力可忽略不计。因此,假设 v_B 在箱体壁面上的切向分解速度 v_{Bt} 碰撞前后不变,则碰撞前后的速度矢量图如图 9 所示,碰撞反弹后马铃薯的运动轨迹由碰撞后的速度方向决定。马铃薯碰撞反弹后的速度方向有 3 种,分别为水平线(横坐标)方向下方 v_{B1}、水平线方向 v_{B2}、水平线上方 v_{B3}。

图 9 中 β 为马铃薯到达碰撞位置时的速度 v_B 与水平方向的夹角,$0° < \beta < 90°$。由于碰撞过程属于非完全弹性碰撞,碰撞前薯块在箱壁法向方向上的分速度 v_{Bn} 应大于碰撞后的法向分速度 v_{Bni}(i 取1、2、3)。结合图 8 可知,此时的运动方

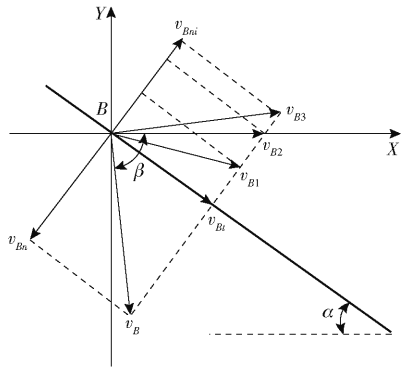


图 9 碰撞速度矢量图

Fig. 9 Collision velocity vector graph

程为

$$\begin{cases} v_B = \sqrt{v_0^2 + 2gY_{OB}} \\ v_{Bn} = v_B \sin(\beta - \alpha) \\ v_{Bt} = v_B \cos(\beta - \alpha) \\ v_{Bni} = e v_{Bn} \\ \beta = \arctan \dfrac{\sqrt{2gY_{OB}}}{v_0} \end{cases} \tag{14}$$

式中 Y_{OB}——点 O 和点 B 竖直方向距离,m

g——重力加速度,取 9.8 m/s^2

α——箱壁与水平面的夹角,(°)

碰撞后马铃薯的运动轨迹会出现 3 种情况,即向上斜抛、平抛和向下斜抛。薯块平抛时应满足关系式 $v_{Bn2} = e v_{Bn} = v_{Bt} \tan\alpha$,结合式(14)可知,此时 $e\tan(\beta - \alpha) = \tan\alpha$,同理当薯块处于向上斜抛时,此时 $e\tan(\beta - \alpha) > \tan\alpha$,向下斜抛时,应满足 $e\tan(\beta - \alpha) < \tan\alpha$。根据上述分析,马铃薯在碰撞后的方向与碰撞恢复系数、箱壁与水平面的夹角及初速度 v_0 有关。在选取壁面柔性材料时,应选取能够完全吸收法向碰撞冲击能的柔性材料,减少马铃薯在碰撞和下落过程中产生的损伤和擦伤,结合前期试验和有关资料,本文中选取包裹有聚氨酯海绵的橡胶材料作为壁面柔性材料[5]。

结合图 8,由坐标系中各个线段位置和角度关系可得 AC 段箱体壁面坐标系的方程为

$$y = -x\tan\alpha - Y_{OA} \tag{15}$$

式中 Y_{OA}——点 O 到点 A 的竖直方向距离,m

薯块在 OB 段运动的参数方程为

$$\begin{cases} x = v_0 t_{OB} \\ y = -\dfrac{1}{2} g t_{OB}^2 \end{cases} \tag{16}$$

式中 t_{OB}——薯块在 OB 段运动的时间,s

联立式(15)、(16)得出马铃薯由 O 抛出后到与薯箱碰撞点 B 的时间 t_{OB} 及点 O 与点 B 在水平和竖直方向的距离 X_{OB}、Y_{OB} 为

$$\begin{cases} t_{OB}=\dfrac{v_0\tan\alpha+\sqrt{v_0^2\tan^2\alpha+2gY_{OA}}}{g} \\ X_{OB}=\dfrac{v_0^2\tan\alpha+v_0\sqrt{v_0^2\tan^2\alpha+2gY_{OA}}}{g} \\ Y_{OB}=\dfrac{v_0^2\tan^2\alpha+v_0\tan\alpha\ \sqrt{v_0^2\tan^2\alpha+2gY_{OA}}}{g}+Y_{OA} \end{cases} \tag{17}$$

由式(14)、(17)得马铃薯到达点 B 的速度 v_B 为

$$v_B=(v_0^2+2v_0\tan\alpha\ \sqrt{v_0^2\tan^2\alpha+2gY_{OA}}+2v_0^2\tan^2\alpha+2gY_{OA})^{\frac{1}{2}} \tag{18}$$

由上述分析可知，马铃薯由点 O 抛出后到达碰撞位置点 B 的下落高度和速度与箱壁与水平面的夹角 α、分拣输送链速度 v_0、箱体顶端点 A 与原点 O 的垂直距离 Y_{OA}成正比。为减小马铃薯到达点 B 的速度，在满足输送链结构设计的情况下，应尽量减小点 A 与点 O 的垂直距离。

薯块在点 B 碰撞后，经过柔性材料对法向冲击能量的吸收，此时马铃薯在 BC 段沿箱壁直线运动，摩擦力做功可以有效减小马铃薯的下落速度，但过长的摩擦距离可能会导致马铃薯产生疲劳累计损伤，因此需要选取合适的 BC 段长度，BC 段运动满足动能守恒定理，即

$$\frac{1}{2}mv_C^2-\frac{1}{2}mv_{Bt}^2+\mu mgL_{BC}\cos\alpha=mgL_{BC}\sin\alpha \tag{19}$$

式中　v_C——马铃薯到达点 C 的速度，m/s

L_{BC}——BC 段箱壁长度，m

μ——马铃薯与箱壁之间摩擦因数

联立式(14)、(18)、(19)得，马铃薯到达出料口点 C 的速度为

$$v_C=\sqrt{v_B^2\cos^2(\beta-\alpha)+2gL_{BC}\sin\alpha-2\mu gL_{BC}\cos\alpha} \tag{20}$$

马铃薯从点 C 滑落，在重力的作用下到达吨包袋点 D，CD 段同样满足动能守恒定理，到达点 D 的速度 v_D 为

$$v_D=\sqrt{v_C^2+2gY_{CD}} \tag{21}$$

式中　Y_{CD}——出料口点 C 到吨包袋初始位置点 D 在竖直方向的距离，m

由式(21)可知，为减小马铃薯落袋时的速度，在不影响升降料斗功能的前提下，尽量减小 Y_{CD}，结合薯块碰撞试验及结合相关资料[19]，出料口到升降料斗的初始距离设为 250 mm。

综合上述分析可知，马铃薯入袋时的速度 v_D 与分拣输送链速度 v_0、集薯箱壁面与水平面夹角 α 成正比。当 $\sin\alpha-\mu\cos\alpha\geqslant0$ 时，v_D 与薯箱 L_{BC}段的长度成正比，当 $\sin\alpha-\mu\cos\alpha<0$ 时，v_D 与 L_{BC} 成反比。

3.2.2　缓存集薯过程马铃薯运动学分析

吨包袋装满时，平移驱动油缸驱动挡薯板将集薯箱的出料口封上，马铃薯的运动轨迹如图 10 所示，薯块到达点 C 的速度即为马铃薯与薯箱底部的挡薯板的碰撞速度。挡薯板表层为表面光滑的柔性材料，为防止挡薯板撤回途中造成马铃薯疲劳损伤，根据前期试验，取挡薯板的宽度为 350 mm，即图 10 中 CE 段的长度。

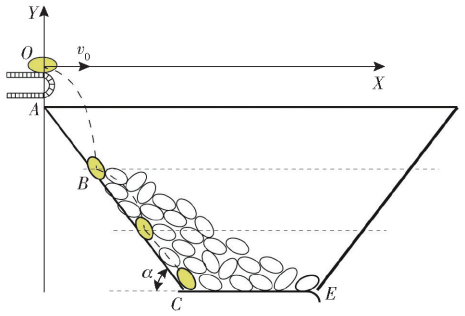


图 10　缓存过程中薯块碰撞运动简图

Fig. 10　Diagram of collision motion of potato chunks during caching process

为防止马铃薯在薯箱另一侧撞伤，在另一侧箱壁表面覆盖一层橡胶棉材料用于缓冲。在缓存过程中，设马铃薯堆积高度为 h，当马铃薯堆积顶部在点 B 以下时，马铃薯落入薯堆的速度满足关系式

$$\frac{1}{2}mv_{h1}^2-\frac{1}{2}mv_{Bt}^2+\mu mg\left(L_{BC}-\frac{h}{\sin\alpha}\right)\cos\alpha=mg(L_{BC}\sin\alpha-h) \tag{22}$$

式中　v_{h1}——BC 段马铃薯下落碰撞速度，m/s

由式(22)可知

$$v_{h1}(h)=\left[v_{Bt}^2-2\mu g\left(L_{BC}-\frac{h}{\sin\alpha}\right)\cos\alpha+2g(L_{BC}\sin\alpha-h)\right]^{\frac{1}{2}} \tag{23}$$

当薯堆顶部超过点 B 时，此时马铃薯由分拣输送链端抛出，直接落到薯堆上，设马铃薯在 AB 段与薯堆的碰撞速度为 v_{h2}，则 AB 段薯块与薯堆的碰撞速度关系式为

$$\begin{cases} mg(Y_{OC}-h)=\dfrac{1}{2}mv_{h2}^2-\dfrac{1}{2}mv_0^2 \\ Y_{OC}=Y_{OA}+L_{AC}\sin\alpha \end{cases} \tag{24}$$

式中　Y_{OC}——点 O 到点 C 竖直方向距离，m

由式(24)可得

$$v_{h2}(h)=\sqrt{v_0^2+2g(Y_{OA}+L_{AC}\sin\alpha-h)} \tag{25}$$

综合上述分析，为减小马铃薯从抛出到装袋过程中由碰撞产生的损伤及累计疲劳损伤，需选取合

适的壁面角度 α、分拣输送链速度 v_0 和箱体壁面长度 L_{AC}。过高的分拣链速度会导致分拣人员劳动强度大、捡拾不净,造成机器作业含杂率过高;速度过低则会造成马铃薯堆积在分拣输送链上,降低整机作业效率。结合前期试验,选取分拣链速度在 0.4 ~ 0.8 m/s 之间。壁面角度过小使得马铃薯下滑的流动性变差,过大时马铃薯直接落入吨包袋中,导致破皮率和伤薯率增加,结合前期试验,选取壁面角度 α 的范围为 40° ~ 60°。由图 6 可知,集薯箱在竖直方向的尺寸需小于 520 mm,水平方向尺寸控制在 1 300 mm 以内,在换袋过程中,需保证薯箱内马铃薯不溢出,计算得出箱体壁面长度 L_{AC} 为 560 ~ 760 mm。

4 试验

4.1 试验材料

试验于河北省固安县中机美诺科技股份有限公司厂区内进行,选用外表面无任何损伤的希森 6 号马铃薯作为试验材料,经过实际测量,马铃薯单个质量为 300 ~ 600 g,含水率为 87.2%。根据所需试验要求加工集薯箱并在表面固定柔性材料,将薯箱固定在试验台架上进行试验。

4.2 评价指标

国内外关于果蔬损伤测定的方法主要有损伤体积法、损伤指数法和损伤面积法[20]。根据 DG/T 078—2022《薯类收获机》,将被擦伤面积大于 2 cm^2 或划痕长度大于 2 cm 的马铃薯视为破皮薯,伤及薯肉面积大于 1 cm^2 或伤及薯肉划痕长度大于 2 cm 的马铃薯视为伤薯。本文采用损伤面积法,通过将擦伤区域近似看作椭圆形,利用椭圆面积计算马铃薯损伤面积。伤薯率 Y_1 和破皮率 Y_2 的计算公式为[21]

$$\begin{cases} Y_1 = \dfrac{m_{p1} + m_{p2}}{M_0} \times 100\% \\ Y_2 = \dfrac{m_{s1} + m_{s2}}{M_0} \times 100\% \end{cases} \tag{26}$$

式中 m_{p1}、m_{p2}——装包、缓存过程破皮薯质量,kg

m_{s1}、m_{s2}——装包、缓存过程伤薯质量,kg

M_0——每次试验所用马铃薯质量,kg

4.3 试验方案与结果

根据理论分析和预试验,采用三因素三水平 Box - Behnken 响应面设计原理,选取壁面角度 α、分拣输送链速度 v_0 和箱体壁面长度 L_{AC} 为试验因素,破皮率和伤薯率为试验指标,各实验因素编码如表 2 所示。每次试验以 100 kg 马铃薯为试验对象,每组试验重复 3 次,每次试验后记录指标值,结果取平均值。试验结果如表 3 所示,X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

表 2 因素编码

Tab. 2 Coding of factors

编码	因素		
	薯箱壁面角度/(°)	输送链速度/(m·s^{-1})	箱体壁面长度/mm
-1	40	0.4	560
0	50	0.6	660
1	60	0.8	760

表 3 试验设计与结果

Tab. 3 Experiment results

试验号	因素			破皮率	伤薯率
	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%
1	-1	-1	0	0.99	0.52
2	1	-1	0	1.12	0.74
3	-1	1	0	1.15	0.70
4	1	1	0	1.19	1.00
5	-1	0	-1	0.97	0.64
6	1	0	-1	1.06	0.89
7	-1	0	1	0.99	0.70
8	1	0	1	1.09	0.96
9	0	-1	-1	0.96	0.61
10	0	1	-1	1.02	0.87
11	0	-1	1	0.98	0.68
12	0	1	1	1.10	0.93
13	0	0	0	0.85	0.83
14	0	0	0	0.88	0.81
15	0	0	0	0.85	0.83
16	0	0	0	0.84	0.81
17	0	0	0	0.87	0.82

使用 Design-Expert 11.1.0 软件对破皮率和伤薯率进行回归模型方差分析,分析结果如表 4 所示。

由表 4 可知,破皮率 Y_1 与伤薯率 Y_2 的回归模型均显著($P < 0.01$),失拟项均不显著($P > 0.05$),说明拟合的回归方程具有高度可靠性,可根据回归模型求解 3 个因素的最优参数组合。

由各因素 P 值可以看出,X_1、X_2、X_1^2、X_2^2、X_3^2 对破皮率 Y_1 的影响极显著,X_3、X_1X_2 对破皮率 Y_1 的影响显著;X_1、X_2、X_3、X_1^2、X_2^2 对 Y_2 的影响极显著,X_1X_2 对伤薯率影响显著,剔除回归方程中的不显著项,从而得到优化后的编码值回归方程为

$$Y_1 = 0.858 + 0.045X_1 + 0.0513X_2 + 0.0188X_3 - 0.0225X_1X_2 + 0.1355X_1^2 + 0.121X_2^2 + 0.036X_3^2 \tag{27}$$

$$Y_2 = 0.8221 + 0.1288X_1 + 0.1188X_2 + 0.0325X_3 + 0.02X_1X_2 - 0.0272X_1^2 - 0.0522X_2^2 \tag{28}$$

表 4　方差分析

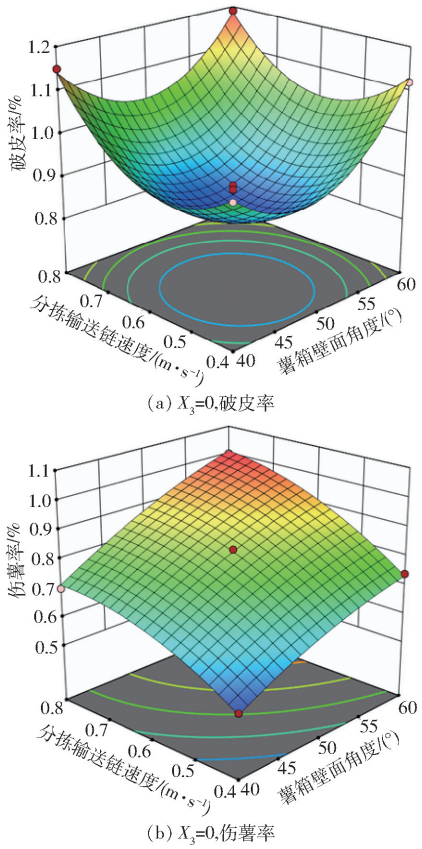
Tab. 4　Variance analysis of regression equations

来源	破皮率 Y_1					伤薯率 Y_2				
	平方和	自由度	均方和	F	P	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	0.197 9	9	0.022 0	87.69	<0.000 1 **	0.271 0	9	0.030 1	205.64	<0.000 1 **
X_1	0.016 2	1	0.016 2	64.62	<0.000 1 **	0.132 6	1	0.132 6	905.65	<0.000 1 **
X_2	0.021 0	1	0.021 0	83.81	<0.000 1 **	0.112 8	1	0.112 8	770.43	<0.000 1 **
X_3	0.002 8	1	0.002 8	11.22	0.012 3 *	0.008 5	1	0.008 5	57.71	0.000 1 **
X_1X_2	0.002 0	1	0.002 0	8.08	0.025 0 *	0.001 6	1	0.001 6	10.93	0.013 0 *
X_1X_3	2.5×10^{-5}	1	2.5×10^{-5}	0.099 7	0.761 4	2.5×10^{-5}	1	2.5×10^{-5}	0.170 7	0.691 8
X_2X_3	0.000 9	1	0.000 9	3.59	0.100 0	2.5×10^{-5}	1	2.5×10^{-5}	0.170 7	0.691 8
X_1^2	0.075 0	1	0.075 0	299.31	<0.000 1 **	0.003 2	1	0.003 2	21.75	0.002 3 **
X_2^2	0.061 6	1	0.061 6	245.88	<0.000 1 **	0.011 6	1	0.011 6	79.26	<0.000 1 **
X_3^2	0.005 5	1	0.005 5	21.77	0.002 3 **	0.000 1	1	0.000 1	0.718 9	0.424 6
残差	0.001 8	7	0.000 3			0.001 0	7	0.000 1		
失拟项	0.000 7	3	0.000 2	0.833 3	0.541 3	0.000 6	3	0.000 2	2.08	0.245 1
误差	0.001 1	4	0.000 3			0.000 4	4	0.000 1		
总和	0.199 6	16				0.272 0	16			

注：** 表示差异极显著（$P\leqslant0.01$）；* 表示差异显著（$0.01<P<0.05$）。

4.4　因素交互作用对试验指标的影响

为直观分析各试验因素的交互作用对评价指标的影响，通过 Design-Expert 11.1.0 软件对结果进行响应面分析。在交互作用中，薯箱壁面角度和分拣输送链速度对破皮率的影响显著，如图 11a 所示，薯箱壁面长度为 660 mm，当薯箱壁面角度固定时，破皮率随着分拣输送链的速度增大先减小后增大，分析其原因是，当分拣输送链的速度较小时，马铃薯被抛出的距离短，在薯板上的滑动距离较长，容易导致马铃薯因疲劳累计擦伤出现破皮现象，从而导致破皮率较大；当分拣输送链速度过大时，马铃薯落袋时的速度大，易出现破皮现象。当分拣输送链初速度一定时，薯箱壁面角度过小时，马铃薯同样会因为抛出距离短，从而在薯板上滑行距离过长造成破皮率过高，角度过小时，马铃薯法向冲击速度大，部分马铃薯出现跳跃翻滚现象导致破皮率增加；当薯箱壁面角度过大时，碰撞冲击能量吸收较少，马铃薯与薯板碰撞后的切向速度与落袋速度过大，由于下落方向的随机性，部分马铃薯还存在翻滚等现象，导致破皮率偏高的情况。对于伤薯率的试验结果分析中，同样是薯箱壁面角度和分拣输送链速度的交互作用对伤薯率的影响显著，如图 11b 所示，壁面长度为 660 mm，当薯箱壁面角度固定时，伤薯率随分拣输送链速度增大而增大，因为分拣输送链速度增大时，马铃薯所具有的动能随之增加，出现损伤的概率越高；当分拣输送链速度固定时，伤薯率随薯箱壁面角度的增大而增大，分析原因是当壁面角度过大时，马铃薯被柔性材料吸收的冲击能量少，翻滚的概率大，导致马铃薯在落袋时的伤薯率增加。



(a) X_3=0,破皮率

(b) X_3=0,伤薯率

图 11　因素交互作用对评价指标影响的响应曲面

Fig. 11　Response surfaces for effect of factors interaction on test indicators

4.5　试验因素最优值组合求解

根据上述试验结果及回归方程，利用 Design-Expert 11.1.0 软件中的优化求解器对目标参数进行优化，以破皮率、伤薯率均最小为优化目标，以薯箱壁面角度、分拣输送链速度和薯箱壁面长度为优化对象进行优化求解，设置目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \\ 0.84\% \leqslant Y_1 \leqslant 1.19\% \\ 0.52\% \leqslant Y_2 \leqslant 1\% \end{cases} \end{cases} \tag{29}$$

得出当薯箱壁面角度为 43.866 8°、分拣输送链速度为 0.437 0 m/s、薯箱壁面长度为 602.793 0 mm 时,破皮率和伤薯率分别为 0.91% 和 0.60%,此时机构总体工作性能最优。

4.6 试验验证

为验证所求得最优组合参数的可靠性,根据实际工作情况及参数优化选取薯箱壁面角度为 44°、分拣输送链速度为 0.44 m/s、薯箱壁面长度为 603 mm,在相同的试验条件情况下,以理论预测最佳参数进行 5 次重复试验验证并取平均值,试验结果统计显示,破皮率为 0.96%,伤薯率为 0.63%。在河北省张家口市沽源县进行田间搭载试验并与需停机卸袋的收获机进行对比试验,机器所有工作参数相同,在同一片地进行试验,如图 12 所示,所得数据如表 5 所示。



(a) 搭载薯箱收获机 (b) 无薯箱收获机

图 12 田间试验对比

Fig. 12 Field experiment comparison

表 5 田间试验结果对比

Tab. 5 Comparison of field experiments results

项目	破皮率/%	伤薯率/%	收获效率/($hm^2 \cdot h^{-1}$)
停机卸袋	3.52	2.34	0.257
不停机卸袋	3.32	2.19	0.364

由田间试验所测得的结果可得,二者均满足 JB/T 14285—2022《马铃薯收获机械》规定的马铃薯联合收获机的破皮率小于等于 5.0%、伤薯率小于 2.5% 的要求。搭载不停机卸袋装置的联合收获机破皮率与伤薯率均略低于停机卸袋收获机破皮率与伤薯率,且搭载不停机卸袋装置的马铃薯联合收获机的效率相较于需停机卸袋的马铃薯联合收获机提高了 41.63%,对霜冻突发时,北方一季作区薯农抢收具有实用价值。

5 结论

(1)设计了一种不停机卸袋装置,包括集薯箱、升降装置等关键部件,实现装袋型马铃薯联合收获机不停机收获作业。

(2)利用 Design-Expert 11.1.0 软件建立了薯箱壁面角度、分拣输送链速度和薯箱壁面长度与破皮率、伤薯率的回归模型。通过响应面法分析了因素交互作用对试验指标的影响规律。对回归模型进行优化处理后,得出薯箱的最佳结构参数及尺寸参数:薯箱壁面角度为 44°、分拣输送链速度为 0.44 m/s、薯箱壁面长度为 603 mm。

(3)台架试验和田间搭载试验表明:台架试验的破皮率为 0.96%,伤薯率为 0.63%,田间搭载试验所得整机破皮率和伤薯率均符合行业标准,且相比于需停机卸袋的马铃薯联合收获机,效率提高了 41.63%。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 孙永佳, 周军, 李学强, 等. 马铃薯联合收获机车身调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 298 – 306.
SUN Yongjia, ZHOU Jun, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of body leveling system for potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 298 – 306. (in Chinese)

[3] 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 in mechanized potato harvesting technology and equipment [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14):1 – 22. (in Chinese)

[4] 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 a 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)

[5] 魏忠彩,韩梦,苏国梁,等.装包卸包型马铃薯联合收获机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(10):92 – 104.
WEI Zhongcai, HAN Meng, SU Guoliang, et al. Design and experiment of a bagging and unloading potato combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(10):92 – 104. (in Chinese)

[6] 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)

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

[8] 鲍国丞, 王公仆, 胡良龙, 等. 甘薯联合收获机高度自适应集薯装置设计与优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 24 - 33.
BAO Guocheng, WANG Gongpu, HU Lianglong, et al. Design and optimization of the height self-adjusting device for sweet potato combined harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(2): 24 - 33. (in Chinese)

[9] 桑永英, 张东兴, 张梅梅. 马铃薯碰撞损伤试验研究及有限元分析[J]. 中国农业大学学报, 2008, 1(4): 81 - 84.
SANG Yongying, ZHANG Dongxing, ZHANG Meimei. Study on bruising damage experiment of potato and finite element analysis[J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 1(4): 81 - 84. (in Chinese)

[10] FINCAN M, DEJMEK P. Effect of osmotic pretreatment and pulsed electric field on the viscoelastic properties of potato tissue [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(2): 169 - 175.

[11] 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 test of roller-guided potato fixed weight bagging machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 159 - 168. (in Chinese)

[12] 高迎旺. 马铃薯隐形损伤的生物散斑活性特征及检测研究[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
GAO Yingwang. Study on biospeckle activity and detection of potato invisible damages[J]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

[13] 瓦伦丁 L·波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及其应用[M]. 2 版. 李强, 雒建斌, 译. 北京:清华大学出版社, 2019.

[14] 彭才望, 周婷, 宋世圣, 等. 基于 Hertz 接触理论的黑水虻幼虫碰撞恢复系数测定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 125 - 134.
PENG Caiwang, ZHOU Ting, SONG Shisheng, et al. Measurement and analysis of restitution coefficient of black soldier fly larvae in collision models based on Hertz contact theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 125 - 134. (in Chinese)

[15] 梅雪峰, 胡卸文, 罗刚, 等. 基于弹塑性理论的落石碰撞恢复系数和峰值冲击力研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(8): 14 - 20.
MEI Xuefeng, HU Xiewen, LUO Gang, et al. A study on the coefficient of restitution and peak impact of rockfall based on the elastic-plastic theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(8): 14 - 20. (in Chinese)

[16] 韩维. 斜碰撞振动系统动力学研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2003.
HAN Wei. Dynamics of oblique-impact vibrating systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)

[17] 刘治震. 马铃薯碰撞问题及分选装备关键机构研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
LIU Zhizhen. Research on potato collision problem and key mechanism of sorting equipment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 武德勇. 马铃薯与杆条升运链碰撞损伤试验研究与参数设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2023.
WU Deyong. Experimental study on collision damage of rod lifting chain to potato and parameter design[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese)

[20] 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)

[21] 魏忠彩, 李洪文, 孙传祝, 等. 振动与波浪二级分离马铃薯收获机改进[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 42 - 52.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuanzhu, et al. Improvement of potato harvester with two segment of vibration and wave separation[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 42 - 52. (in Chinese)