doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.016

辊式导流马铃薯定重装袋机设计与试验

王相友[1,2]　张　蒙[1]　李学强[2,3]　王荣铭[1]　苏国梁[1]　王法明[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: 装袋是马铃薯从收获到运输、储藏的重要环节。为解决现有马铃薯装袋机效率低、损伤率高的问题,设计了一种高效、低损的辊式导流马铃薯定重装袋机,主要由支撑装置、分流输送装置、导流装置、撑袋装置和定重装袋装置构成。通过多工位装袋实现了高效,通过辊式导流实现了低损伤。通过对该机关键部件的力学分析和导流过程的运动学分析,确定了影响马铃薯损伤和装袋效率的主要因素为导流仓门角度、输送速度和上料量。以导流仓门角度、输送速度和上料量为试验因素,以破皮率、伤薯率和单口装袋效率为试验指标,进行了二次回归正交旋转组合试验,通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行方差分析,通过响应面试验分析了试验交互因素对试验指标的影响规律。利用 Design-Expert 8.0.6 软件优化模块并结合实际工作情况确定各因素最佳取值,在此基础上进行了试验台验证试验,结果表明:当导流仓门角度为 45°、输送速度为 0.35 m/s、上料量为 27 t/h 时,破皮率为 1.8%、伤薯率为 1.4%、单口装袋效率为 12.4 t/h,在该参数组合下辊式导流马铃薯定重装袋机破皮率和伤薯率均较低,且装袋效率较高。

关键词: 马铃薯; 辊式导流; 装袋机; 定重装袋

中图分类号: S229$^+$.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0159-10　　**OSID**:

Design and Test of Roller-guided Potato Fixed Weight Bagging Machine

WANG Xiangyou[1,2]　ZHANG Meng[1]　LI Xueqiang[2,3]　WANG Rongming[1]　SU Guoliang[1]　WANG Faming[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 Sidaier Agricultural Equipment Co., Ltd., Dezhou* 253600, *China*)

Abstract: Bagging is an important link from harvesting to transportation and storage of potatoes. To solve the problems of low efficiency and high damage rate of existing potato bagging machines, a new infusion, bag support and fixed weight bagging structure was designed, an efficient and low damage roller-type infusion potato fixed weight bagging machine was developed, and mechanical analysis of key components of the machine and kinematic analysis of key motion processes were conducted, and the main factors affecting the damage and bagging efficiency were identified as inflow bin door angle, conveying speed and loading volume. A quadratic regression orthogonal rotating combination test was conducted with the inflow bin door angle, conveying speed and loading volume as the test factors, and the breakage rate, injury rate and single-port bagging efficiency as the test indicators, and the test results were analyzed by ANOVA with Design-Expert 8.0.6 to determine the main order of the factors affecting the test indicators and to fit the test data. The test factors were analyzed by visually discerning the optimization region through response surface analysis, and the influence law of the test factors on the test indexes was analyzed. Using Design-Expert 8.0.6 optimization module and combining with the actual working situation to determine the optimal values of each factor, a test bench verification test was conducted on this basis, and the test results showed that when the inflow bin door angle was 45°, the conveying speed was 0.35 m/s, and the loading volume was 27 t/h, the breakage rate was 1.8%, the injury rate was 1.4%, and the single-port bagging efficiency was 12.4 t/h, this parameter under the roller type guide flow potato fixed weight bagging machine breakage rate and injury rate was lower, and the bagging efficiency was higher.

Key words: potato; roll diversion; bagging machine; fixed weight bagging

收稿日期: 2021-02-02　修回日期: 2021-04-19

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(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: wxy@sdut.edu.cn

0 引言

为提高运输、贮藏的便携性,收获后的马铃薯需进行装袋处理。但装袋机使马铃薯损伤严重,因此,研制高效、低损马铃薯装袋机很有必要。

马铃薯入袋后的品质将影响运输、贮藏效果,马铃薯的主要损伤是装袋机造成的机械损伤。我国马铃薯装袋机械化水平较低,马铃薯装袋多为人工捡拾,不但耗费了大量人力,而且装袋效率低。仅少数采用小型马铃薯装袋机进行作业,但单袋马铃薯质量不统一,且破皮率、伤薯率得不到保障[1-4]。马铃薯在机械收获过程中的损伤一般为碰撞损伤、摩擦损伤和挤压损伤等,其中碰撞损伤和摩擦损伤是主要损伤形式[5-8]。碰撞损伤多为马铃薯与机器碰撞造成,通常采用柔性材料或减小碰撞冲击距离实现减损。由于鲜薯有泥土附着,在输送过程中易产生堆积和停滞,从而产生“自转”现象,同时马铃薯受薯-薯之间的冲击力作用,在变载荷下自转,从而造成擦伤,因此减少马铃薯在装袋过程中的“自转”可有效减轻其摩擦损伤。根据前期调研,针对上述问题,本文设计一种装袋效率较高、损伤率较低的辊式导流马铃薯定重(质量)装袋机,对其关键部件和工作过程进行理论分析,通过二次回归正交旋转组合试验确定最佳工作参数,并进行田间装袋验证试验。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

辊式导流马铃薯定重装袋机主要包括支撑装置、分流输送装置、导流装置、撑袋装置和定重装袋装置等。其中支撑装置主要由可调支撑腿和支撑架构成;分流输送装置主要由调速电机和分流输送机构构成;导流装置主要由导流仓门、四杆挡薯机构和仓门气缸构成;撑袋装置主要由撑袋口和压袋气缸构成;定重装袋装置主要由装袋平台和质量检测机构构成,其结构简图如图 1 所示。

1.2 工作原理及技术参数

辊式导流马铃薯定重装袋机在进行装袋作业时,薯块自前端设备落入装袋机入料缓冲口,调速电机驱动载有薯块的输送带运转。当薯块输送至装袋出料口时,导流仓门改变其运动轨迹,使薯块沿仓门运动,继而跌落至装袋平台上的薯袋中。薯袋挂接于撑袋口并由橡胶气缸压板压紧。伴随着薯块的跌落,装袋平台质量逐渐增大,致使压簧产生形变,装袋平台随之下移,传感器采集平台下移信息,从而发送信号至 PLC 处理信息,通过电磁换向阀控制导流仓门气缸动作将仓门关闭。仓门关闭过程中,与之

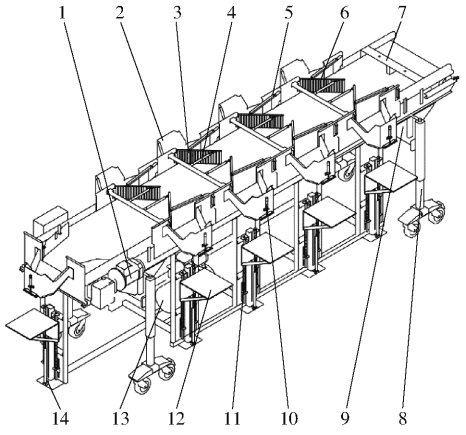


图 1 辊式导流马铃薯定重装袋机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of potato fixed weight bagging machine with roller guide

1. 调速电机 2. 撑袋口 3. 导流仓门 4. 仓门气缸 5. 四杆挡薯机构 6. 导流辊 7. 分流输送装置 8. 支撑腿 9. 支撑架 10. 压袋气缸 11. 质量检测机构 12. 装袋平台 13. 气泵 14. 传感器

构成四杆机构的挡薯板联动,挡薯板隆起角度与仓门关闭角度成反比,从而避免仓门处的夹薯现象。仓门关闭后,控制压袋气缸松开薯袋,完成一次装袋工作。其中导流仓门、压袋机构均由气缸执行动作,质量检测机构通过压簧阻尼系统和传感器配合实现功能。

马铃薯装袋机每侧 4 个装袋装置间歇作业,当前 3 个仓门全部装满关闭时,第 4 个装袋装置开始装袋,经过相应时间余量,PLC 控制打开首端仓门以避免第 4 个装袋装置装袋超出质量,第 4 个装袋装置装满发送信号至 PLC,相继打开第 2、3 仓门准备装袋工作。辊式导流马铃薯定重装袋机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 辊式导流马铃薯定重装袋机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of potato fixed weight bagging machine with roller guide

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 780×1 750×(100~140)
整机质量/kg	610
配套动力/kW	0.75(减速电机)
输送速度/(m·s^{-1})	0.3~0.6
装袋口数量/个	9(含 1 个备用装袋口)
装袋效率/(t·h^{-1})	>18

2 关键部件设计

2.1 定重装袋控制系统

为满足辊式导流马铃薯定重装袋机的工作需求,设计适用于该装袋机的定重装袋控制系统,实现各装袋口的自动定重装袋,其主要包括检测模块、仓

门控制模块、压袋控制模块和报警预警模块。

辊式导流马铃薯定重装袋机动力源选用 GPG 减速电机，考虑到导流仓门的关闭以及实际应用性，装袋机采用气压传动，通过 CDJ2D16 型气缸控制导流仓门的开闭以及压袋动作，系统主控制模块选用西门子 PLC S7 - 200。系统硬件主要由主控制器、MW T - 200D 型开关电源、TPC7062Ti 型触摸屏、UB1000 - 18GM75 - V1 型传感器、C12 - 10NO 型速度传感器、ITV2030 - 312LX 型比例控制阀、变频器和 4V210 -08 型电磁换向阀等构成。系统通过对采集到的物料厚度、薯袋质量和输送速度进行运算，来协调各执行元件的工作，其控制原理框图如图 2 所示。

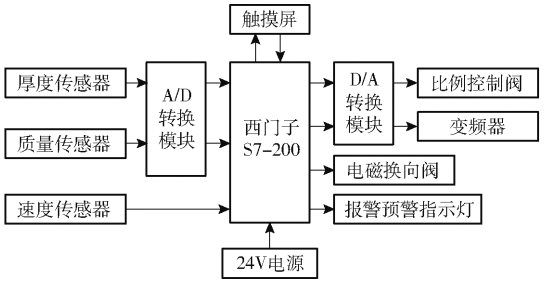


图 2　控制原理框图

Fig. 2　Block diagram of control principle

2.2　导流装置

导流装置是马铃薯装袋机的重要组成部分，主要由导流仓门和四杆挡薯机构构成，其机械结构型式和参数严重影响马铃薯装袋的薯块损伤和效率，因此将重点研究导流装置，通过理论分析确定其基本结构和相关参数。

2.2.1　结构设计与参数确定

因导流装置与薯块行进方向存在夹角，当最前端薯块输送至导流仓门处时发生碰撞，撞击瞬间薯块运动状态发生突变[9-10]，并受其他薯群的冲击，当导流仓门与薯块前进方向的夹角为 90°时，薯块与导流仓门发生正面撞击，此时薯块受到的沿导流仓门方向的分力为零，故本文仅对导流仓门与马铃薯行进方向夹角小于 90°的情况进行分析。设单个薯块所受合力为 F_0，其受力表达式为

$$F_0 = \sum_{i=1}^{n} F_i + f_1 \tag{1}$$

其中

$$f_1 = M_s g \mu_1 \tag{2}$$

式中　F_i——薯群对薯块 i 的冲击力，N

f_1——薯块与输送带摩擦力，N

M_s——单个薯块质量，kg

μ_1——薯块与输送带摩擦因数

g——重力加速度，取 9.8 m/s^2

此时薯块受导流仓门的摩擦力表达式为

$$f_2 = F_{n_0}\mu_2 \tag{3}$$

式中　F_{n_0}——薯块受仓门支持力，N

μ_2——薯块与仓门摩擦因数

由式(1)、(2)可知，此时薯块受到薯群的冲击致使其受仓门支持力较大，结合式(3)可知导流仓门阻碍其向下运动的 f_2 较大。

当上料量较小时，薯块所受 F_0 较小，不足以将薯块推动，从而导致薯块沿仓门方向运动停滞，同时薯块在 f_1 作用下出现翻滚，此时薯皮循环摩擦极易造成累积疲劳损伤，因此采用辊式导流。辊式导流的优点是在辊子布置方向摩擦力较小可忽略不计，从而减小翻滚时间，达到有效减损。

导流仓门由辊子并排安装构成，两辊间隙应在保证方便安装前提下尽量小，其原因是辊子间隙过大时不利于薯块的下行，且间隙较大会导致薯块与导流辊正碰撞概率增大，从而堆积概率增大，从而造成薯块损伤；两辊间隙较小时可看作摩擦力较小的平板，有利于导流。通过安装和导流试验，本文确定两辊中心距为 22.5 mm，辊子外径为 20 mm。

2.2.2　力学分析

2.2.2.1　碰撞损伤分析

导流辊布置间隙较小，发生碰撞时可看作薯块与下行方向摩擦力较小的平板撞击。薯块与导流辊碰撞属于恢复系数为 0 ~ 1 的非完全弹性碰撞[11-12]，碰撞过程符合动量守恒[9-10]，碰撞过程动量公式为

$$M_s v_1 - M_s v_2 = \int_{t_1}^{t_2} F \mathrm{d}t \tag{4}$$

式中　v_1——碰撞初速度，m/s

v_2——碰撞末速度，m/s

t_1——碰撞开始时刻

t_2——碰撞结束时刻

F——碰撞力，N

根据弹性力学，在任何短暂的碰撞过程中，与相碰物体间巨大的内力相比，外力的冲量可忽略[13-14]。据式(4)可知，马铃薯的速度在短时间内发生有限的变化，由于碰撞过程时间极短，故碰撞力较大[14-15]，易对马铃薯造成碰撞损伤。形变势能转化为动能，马铃薯以一定速度弹出。

设薯与辊开始接触时动能为 T_z，导流辊变形不计，且只考虑弹性，便简化为单自由度的运动系统，如图 3 所示。由弹性力学两物碰撞原理知，由于薯块弹性阻尼的作用，薯块撞击面法向速度逐渐变小，处于最大程度挤压状态时，薯块撞击局部达到最大变形量，系统速度变为零[13]，薯块变形量为 Δd，自薯块与辊接触至薯块最大变形，系统动能由 T_z 变为

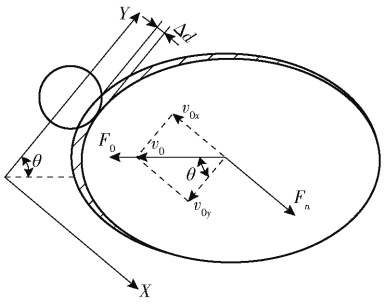


图 3 薯块碰撞过程受力简图

Fig. 3 Simplified diagram of force on potato chunks collision process

零,动能变化量为 ΔT_z,此后形变回复,其表达式为

$$\begin{cases} T_z = \dfrac{1}{2} M_s v_n^2 \\ \Delta T_z = T_z \end{cases} \tag{5}$$

式中 v_n——法向撞击速度,m/s

薯块与辊冲击系统动能和势能的变化量应等于薯块的应变能,即

$$\Delta T_z + \Delta V_z = V_{\varepsilon d} \tag{6}$$

式中 ΔV_z——势能变化量,J

$V_{\varepsilon d}$——薯块应变能,J

薯块与辊冲击系统为水平系统,其势能变化量 $\Delta V_z = 0$。设系统速度为零时薯块的动载荷为 F_d,薯块与辊冲击过程动载荷做功为

$$W_z = \frac{1}{2} F_d \Delta d \tag{7}$$

动载荷做功应等于薯块的应变能,即

$$V_{\varepsilon d} = \frac{1}{2} F_d \Delta d \tag{8}$$

若薯块 $M_s g$ 以静载形式压在导流辊上,设薯块的静变形和静应力分别为 Δ_s 和 σ_s。在动载荷 F_d 作用下,其变形和应力分别为 Δd 和 σ_d。在线弹性范围内,即符合胡克定律的情况下,载荷、变形和应力正相关,则

$$\frac{F_d}{M_s g} = \frac{\Delta d}{\Delta_s} = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \tag{9}$$

联立式(5)~(9)得

$$\begin{cases} F_d = \sqrt{\dfrac{v_n^2}{\Delta_s}} M_s \\ \sigma_d = \sqrt{\dfrac{v_n^2}{g\Delta_s}} \sigma_s \end{cases} \tag{10}$$

由上述分析知,马铃薯的撞击速度影响撞击时的应力,继而造成马铃薯块茎的损伤。

2.2.2.2 翻滚损伤分析

由于马铃薯呈近似椭圆形,以单个薯块为研究对象,薯块在碰撞后,自身状态趋于稳定,以最稳定的状态依附在导流辊一侧。如图 4 作空间坐标系,其受力如图 4 所示。

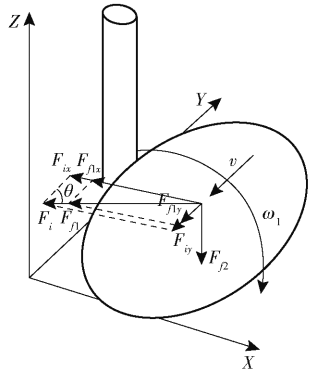


图 4 薯块翻滚过程受力简图

Fig. 4 Simplified diagram of force during tumbling process of potato chunks

此阶段输送带持续运转,薯块分别在 *XY* 面和 *YZ* 面与输送带和导流辊接触,薯块底端受到薯-带动摩擦力 F_{f1},且 F_{f1} 作用面与薯、辊接触面存在 *Z* 方向高度差 h_z,薯块受力不平衡,促使薯块有翻滚趋势。同时薯块受其他薯块的冲击力,由于薯块与输送带接触处受 F_{f1} 以及 *X* 轴分量 F_{f1x}、F_{ix} 的作用,阻碍薯块的翻滚趋势。薯块翻滚的受力公式为

$$\begin{cases} F_{f_1} = M_s g \mu_d \\ F_{f_2} = (F_{f_1} + F_i)\mu_g \sin\theta \\ F_y = (F_{f_1} + F_i)\cos\theta \end{cases} \tag{11}$$

式中 μ_d——薯-带动摩擦因数

F_{f2}——薯与辊摩擦力,N

μ_g——薯-辊摩擦因数

θ——导流仓门与侧板夹角,(°)

F_y——冲击力和薯-带动摩擦力 *Y* 轴分量,N

由翻滚过程受力分析可知,在导流辊角度、输送速度一定的条件下,薯块能否向下运动以及翻滚速度取决于 F_i,即取决于马铃薯的上料量。$F_y \leqslant F_{f1}$,薯块不能沿辊向下运动;$F_y \geqslant F_{f1}$,薯块能沿辊向下运动。

2.2.3 导流过程运动学分析

为避免挡薯板联动时与中间连杆出现死点,应始终保证挡薯板与中间连杆夹角 $\alpha > 180°$[16-17]。马铃薯在碰撞之前与输送带以相同的速度 v_s 运动,不同的上料量致使薯群密集程度不一,薯与辊接触后将出现碰撞跃起-直线运动和沿辊直线运动两种现象,且沿辊直线运动阶段往往伴随薯块的自转。

上料量较小(小于 20 t/h)时,薯块为碰撞跃起-直线运动,运动过程如图 5 所示。根据两体碰撞原理,速度为 v_s 的薯块以入射角 θ 冲击导流辊,碰撞过程完成后以速度 v_a 反射角 θ 跃起,经过多次抛物线运动,最终伴随翻滚沿辊运动至出料口。由于除 *AC* 段外,其他阶段跃起不明显,故对 *CD* 段进行直线运

动分析。

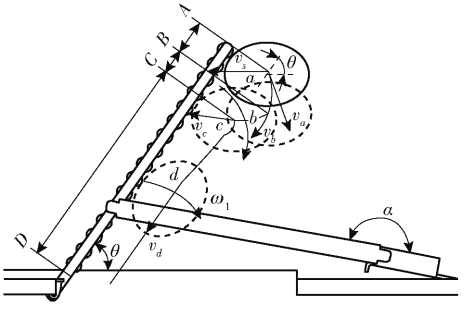


图 5　小上料量导流过程薯块运动简图

Fig. 5　Diagram of movement of potato chunks in diversion process of small feed volume

以装袋机输送方向的反向并过导流仓门末端为 Y 轴，与导流仓门呈 $(90°-\theta)$ 夹角为 X 轴作平面坐标系，则 AC 段运动过程如图 6 所示。

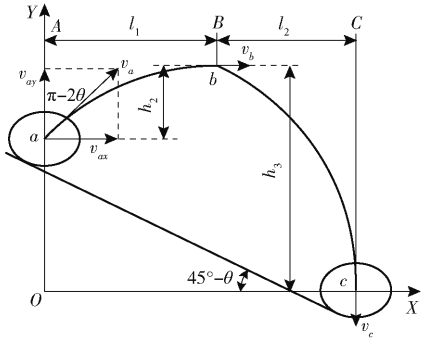


图 6　薯块跃起运动学分析

Fig. 6　Kinematic analysis of jumping of potato chunks

薯块在点 A 第 1 次碰撞完成后以初速度 v_a 弹出，v_{ax} 和 v_{ay} 分别为反弹脱离导流辊后水平分速度和竖直分速度，薯块在竖直方向和水平方向均受薯–带动摩擦力，其加速度为

$$a_x = a_y = \mu_d g \tag{12}$$

v_{ax} 和 v_{ay} 表达式为

$$\begin{cases} v_{ax} = v_a \cos(\pi - 2\theta) - a_x t \\ v_{ay} = v_a \sin(\pi - 2\theta) - a_y t - v_s \end{cases} \tag{13}$$

式中　v_s——输送带输送速度，m/s

由上述表达式得到，AC 阶段 v_{ax} 始终为加速度为 a_x 的匀减速运动，Y 轴方向 AB 阶段 v_{ay} 以加速度 a_y 匀减速至与 v_s 相等，此时 Y 轴方向薯块与导流辊相对静止，此时薯块弹起的最大高度 h_2 为

$$h_2 = v_{ay} t_{ab} + \frac{1}{2} a_y t_{ab}^2 \tag{14}$$

其中

$$v_{ay} = v_s - a_y t_{ab} \tag{15}$$

式中　t_{ab}——AB 段薯块运动时间，s

h_2——薯块第 1 次跃起距离的 Y 轴分量，m

下一时刻 v_{ay} 实际速度方向反转，并以加速度 a_y 作匀加速运动，合运动为平抛运动，则

$$h_3 = \frac{1}{2} a_y t_{bc}^2 \tag{16}$$

式中　h_3——薯块与辊身 2 次碰撞的 Y 轴冲击距离，m

t_{bc}——BC 段薯块运动时间，s

薯块在点 C 发生二次冲击，但 h_3 数值较小，v_{ay} 在 a_y 加速下的末速度小于 v_s，冲击力远小于第 1 次冲击。由式(14)～(16)得薯块弹起回落时间 t_{ac} 表达式为

$$t_{ac} = t_{ab} + t_{bc} \tag{17}$$

t_{ac} 时间内薯块水平方向位移为

$$l_{ac} = l_1 + l_2 \tag{18}$$

式中　l_1——最大跃起高度时沿 X 轴的位移，m

l_2——最大跃起点至再次撞击导流仓门的沿 X 轴位移，m

AC 阶段结束薯块趋于稳定，CD 阶段沿导流辊直线运动至出料口，CD 段长度 l_{CD} 表达式为

$$l_{CD} = l_{AD} - \frac{l_1 + l_2}{\sin\theta} \tag{19}$$

式中　l_{AD}——导流仓门总长，m

CD 阶段薯块为初速度为 v_c 的运动，且伴随翻滚和薯群的冲击。

上料量较大(大于 24 t/h)时，薯块无弹起空间，如图 7 所示，AD 段均为伴随自转的直线运动，此时因上料量及排列不均匀等因素影响，薯块受冲击力 F_i 较复杂且不唯一，故其下行运动方程可写为

$$l_{AD} = \sum_{i=1}^{n} \left[v_i t_i + \frac{1}{2} (a_i - \mu_d g) t_i^2 \right] \tag{20}$$

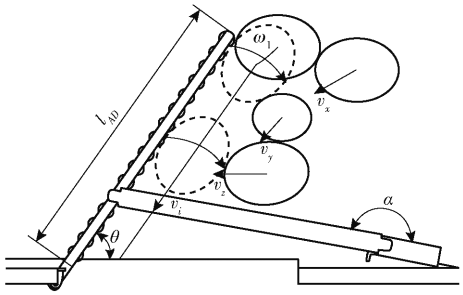


图 7　大上料量导流过程薯块运动简图

Fig. 7　Simplified diagram of movement of potato chunks in process of diversion with large feed volume

由上述分析可知，薯–辊接触时间取决于薯块跃起的初速度和 F_i 对下行速度的补充，为避免此阶段运动时间过长，薯块产生疲劳损伤和堆积，应选择合适的导流仓门角度(15°～90°)、输送带速度(大于 0.25 m/s)和马铃薯上料量，其将影响薯块 CD 段运动时间，继而影响破皮率、伤薯率和装袋效率。

2.3　定重装袋装置

定重装袋装置是规范薯袋质量的关键部件，主要由装袋平台、升降滑轨、压簧阻尼系统和传感器构成。

本设计采用压簧作为质量的衡量模块,利用其结构简单、形变与受力线性相关的特性,从而保持薯堆与出料口纵向距离的稳定,达到有效减损。由相关马铃薯跌落损伤试验可知,薯块跌落损伤是主要损伤之一[11,18],故所设计装袋平台采用柔性材料,并根据实际作业情况确定装袋平台与出料口纵向距离 h_z。

根据市场调研,一般情况下马铃薯装袋质量小于等于 40 kg,袋长为 800 mm 左右,根据压簧设计方法[19]计算选用压簧(每个定重装袋装置装配 2 根)参数为螺旋中径 18 mm,线径 2 mm,总圈数 30,节距 15.8 mm。

装袋作业时,薯块平抛跌落至装袋平台,薯块与装袋平台碰撞前速度表达式为

$$v_e = v_{d2} + \sqrt{2gh_z} \tag{21}$$

式中 v_e——薯块与装袋平台碰撞前速度,m/s

v_{d2}——薯块脱离导流辊时速度,m/s

由式(21)知,辊式马铃薯定重装袋机各机构参数确定前提下,薯块跌落时的速度主要由薯块脱离出料口底板初速度(薯块与导流仓门碰撞后末速度)和跌落高度决定,因此只需在满足方便作业情况下缩小跌落高度即可减损。

同时,装袋平台压簧受到薯块跌落冲击做简谐运动,假设同时跌落质量为 M_d,则其运动表达式为

$$(M_p + M_d)v_g = M_d v_e \tag{22}$$

式中 v_g——薯块跌落至装袋平台后共同速度,m/s

M_p——无薯块时装袋平台质量,kg

系统在振动过程中机械守恒,即

$$\frac{1}{2}(M_p + M_d)v_g^2 + \frac{1}{2}kx_0^2 = \frac{1}{2}kA^2 \tag{23}$$

式中 k——压簧劲度系数,N/m

A——简谐运动振幅,m

x_0——系统平衡位置压簧行程,m

由式(21)~(23)得

$$A = \sqrt{\frac{2M_d^2 gh_z}{(M_p + M_d)k} + \frac{M_d^2 g^2}{k^2}} \tag{24}$$

由式(24)知,压簧振幅与 M_d、h_z 正相关,压簧振幅过大会造成薯-薯碰撞损伤,故应尽量减小装袋平台与出料口纵向距离 h_z,且装袋平台采用柔性材料以避免碰撞损伤,同时压簧卸荷后的形变回复过程具有危险性,因此本设计采用气压撑杆阻尼器吸收压簧振动来有效减损。

3 试验与结果分析

3.1 试验材料

试验于 2020 年 7 月在山东思代尔农业装备有限公司厂区内进行,本文所设计的马铃薯装袋机适用于单颗质量小于 500 g 马铃薯装袋,试验选用收获期分级后希森 3 号马铃薯作为试验材料。经实际测量计算,马铃薯单个质量为 100~300 g,含水率为 84.6%,且薯块均无外部损伤。

3.2 评价指标

3.2.1 破皮率和伤薯率

根据相关研究,目前国内外测定球形果蔬损伤主要有体积法和面积法,本文采用面积法。面积法是将擦伤区域近似为椭圆形,采用椭圆面积公式计算马铃薯实际擦伤面积[20-21],擦伤面积大于 0.2 cm^2 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[19,22],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。其破皮率 y_1 和伤薯率 y_2 计算公式为

$$\begin{cases} y_1 = \dfrac{m_p}{M_z} \times 100\% \\ y_2 = \dfrac{m_s}{M_z} \times 100\% \end{cases} \tag{25}$$

式中 m_p——每袋中视为破皮薯质量,kg

m_s——每袋中视为伤薯质量,kg

M_z——每袋总质量,kg

3.2.2 单口装袋效率

通过记录相应装袋质量下的装袋时间得到单口装袋效率,试验所用秒表为 LNS-030 型,其计算公式为

$$\eta = 3.6\frac{M_z}{t_z} \tag{26}$$

式中 η——单口装袋效率,t/h

t_z——装袋质量为 M_z 所用时间,s

3.3 试验方案及结果

试验以辊式导流马铃薯定重装袋机导流仓门角度、输送速度和上料量为试验因素,以装袋机破皮率、伤薯率和单口装袋效率为指标,采用 Design-Expert 8.0.6 软件设计二次回归正交旋转组合试验[23-24],其因素编码如表 2 所示。其中导流仓门角度通过调节导流仓门连杆改变,输送速度通过变频器调节,上料量通过改变输送带上薯块的疏密程度改变。试验过程中以每袋 30 kg 马铃薯为试验对象,每组试验重复 3 次,装袋完成后记录指标值,试验结果如表 3 所示。

3.4 试验结果方差分析

试验指标方差分析结果如表 4~6 所示。通过 Design-Expert 8.0.6 软件建立线性回归模型拟合试验数据,进行显著性检验,并通过比较偏回归系数确定影响因素的主次关系。由表 4~6 可知,破皮率、

表 2　因素编码

Tab. 2　Factors coding

编码	因素		
	导流仓门角度 x_1/(°)	输送速度 x_2/(m·s^{-1})	上料量 x_3/(t·h^{-1})
1.682	60	0.600	30.0
1	56	0.550	27.0
0	50	0.475	22.5
−1	44	0.400	18.0
−1.682	40	0.350	15.0

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Test plan and results

试验号	因素			破皮率/%	伤薯率/%	单口装袋效率/(t·h^{-1})
	导流仓门角度 x_1/(°)	输送速度 x_2/(m·s^{-1})	上料量 x_3/(t·h^{-1})			
1	44	0.400	18.0	2.1	1.1	8.5
2	56	0.400	18.0	2.9	1.8	8.4
3	44	0.550	18.0	1.9	1.6	8.3
4	56	0.550	18.0	3.2	2.3	8.6
5	44	0.400	27.0	2.1	1.6	10.8
6	56	0.400	27.0	2.6	2.1	12.5
7	44	0.550	27.0	2.6	2.1	12.5
8	56	0.550	27.0	3.7	2.6	12.8
9	40	0.475	22.5	2.4	1.5	9.6
10	60	0.475	22.5	4.1	2.6	9.1
11	50	0.350	22.5	2.5	1.4	10.3
12	50	0.600	22.5	2.6	2.5	10.9
13	50	0.475	15.0	2.2	1.9	6.8
14	50	0.475	30.0	2.4	2.5	14.2
15	50	0.475	22.5	2.8	2.0	10.6
16	50	0.475	22.5	2.6	1.9	10.3
17	50	0.475	22.5	2.7	1.8	10.0
18	50	0.475	22.5	2.5	1.7	9.5
19	50	0.475	22.5	2.9	1.9	10.1
20	50	0.475	22.5	2.5	2.1	10.4
21	50	0.475	22.5	2.9	1.8	9.8
22	50	0.475	22.5	2.6	1.7	10.4
23	50	0.475	22.5	2.8	1.6	9.9

伤薯率和单口装袋效率模型项均表现为 $P<0.01$，表明模型显著。破皮率、伤薯率和单口装袋效率失拟项均表现为 $P>0.1$，不显著，表明各回归方程拟合较好，具有实际意义，可较好地表示导流仓门角度、输送速度和上料量与破皮率、伤薯率、单口装袋效率的数学关系。

表 4 显示，对马铃薯破皮率的影响显著程度由大到小为 x_1、x_1^2、x_3^2、x_2x_3、x_2、x_1x_2、x_3、x_2^2、x_1x_3，其中 x_1、x_2、x_2x_3、x_1^2、x_3^2 对破皮率影响极显著($P<0.01$)，x_1x_2对破皮率影响显著($0.01<P<0.05$)，x_3对破皮率影响较显著($0.05<P<0.1$)，其他因素对破皮率

表 4　破皮率方差分析

Tab. 4　Analysis of variance of breakage rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	4.96	9	0.55	21.08	<0.000 1 ***
x_1	3.15	1	3.15	120.50	<0.000 1 ***
x_2	0.26	1	0.26	9.78	0.008 0 ***
x_3	0.11	1	0.11	4.28	0.059 0 *
x_1x_2	0.15	1	0.15	5.79	0.031 8 **
x_1x_3	0.03	1	0.03	1.20	0.294 1
x_2x_3	0.28	1	0.28	10.76	0.006 0 ***
x_1^2	0.52	1	0.52	20.02	0.000 6 ***
x_2^2	0.07	1	0.07	2.65	0.127 7
x_3^2	0.38	1	0.38	14.49	0.002 2 ***
残差	0.34	13	0.03		
失拟	0.14	5	0.03	1.12	0.421 7
系统误差	0.20	8	0.03		
总和	5.29	22			

注：*** 表示差异极显著($P<0.01$)；** 表示差异显著($0.01<P<0.05$)；* 表示差异较显著($0.05<P<0.1$)。下同。

表 5　伤薯率方差分析

Tab. 5　Analysis of variance of potato injury rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3.08	9	0.34	13.58	<0.000 1 ***
x_1	1.32	1	1.32	52.40	<0.000 1 ***
x_2	1.09	1	1.09	43.00	<0.000 1 ***
x_3	0.50	1	0.50	19.75	0.000 7 ***
x_1x_2	4.44×10^{-16}	1	4.44×10^{-16}	1.76×10^{-14}	1.000 0
x_1x_3	0.02	1	0.02	0.79	0.389 6
x_2x_3	4.44×10^{-16}	1	4.44×10^{-16}	1.76×10^{-14}	1.000 0
x_1^2	0.02	1	0.02	0.96	0.344 4
x_2^2	2.24×10^{-4}	1	2.24×10^{-4}	0.01	0.926 4
x_3^2	0.13	1	0.13	5.34	0.037 8 **
残差	0.33	13	0.03		
失拟	0.13	5	0.03	1.02	0.463 1
系统误差	0.20	8	0.03		
总和	3.41	22			

表 6　单口装袋效率方差分析

Tab. 6　Analysis of variance of single-port bagging efficiency

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	58.20	9	6.47	34.16	<0.000 1 ***
x_1	0.14	1	0.14	0.71	0.413 3
x_2	0.66	1	0.66	3.50	0.084 0 *
x_3	54.35	1	54.35	287.08	<0.000 1 ***
x_1x_2	0.13	1	0.13	0.66	0.431 1
x_1x_3	0.41	1	0.41	2.14	0.167 3
x_2x_3	0.50	1	0.50	2.64	0.128 1
x_1^2	0.90	1	0.90	4.77	0.047 8 **
x_2^2	0.66	1	0.66	3.47	0.085 1 *
x_3^2	0.45	1	0.45	2.37	0.147 5
残差	2.46	13	0.19		
失拟	1.49	5	0.30	2.46	0.123 3
系统误差	0.97	8	0.12		
总和	60.67	22			

影响不显著($P>0.1$),将不显著项删除后并重新进行拟合得实际值多元二次回归方程为

$$y_1=14.32-0.53x_1-15.10x_2+0.22x_3+0.31x_1x_2+0.57x_2x_3+5.13\times10^{-3}x_1^2-7.76\times10^{-3}x_3^2 \quad (27)$$

表 5 显示,对马铃薯伤薯率的影响显著程度由大到小为 x_1、x_2、x_3、x_3^2、x_1^2、x_1x_3、x_2^2、x_1x_2、x_2x_3,其中 x_1、x_2、x_3对破皮率影响极显著($P<0.01$),x_3^2 对伤薯率影响显著($0.01<P<0.05$),其他因素对伤薯率影响不显著($P>0.1$),将不显著项删除后并重新进行拟合得实际值多元二次回归方程为

$$y_2=-0.016x_1+3.15x_2-0.071x_3+4.63\times10^{-3}x_3^2 \quad (28)$$

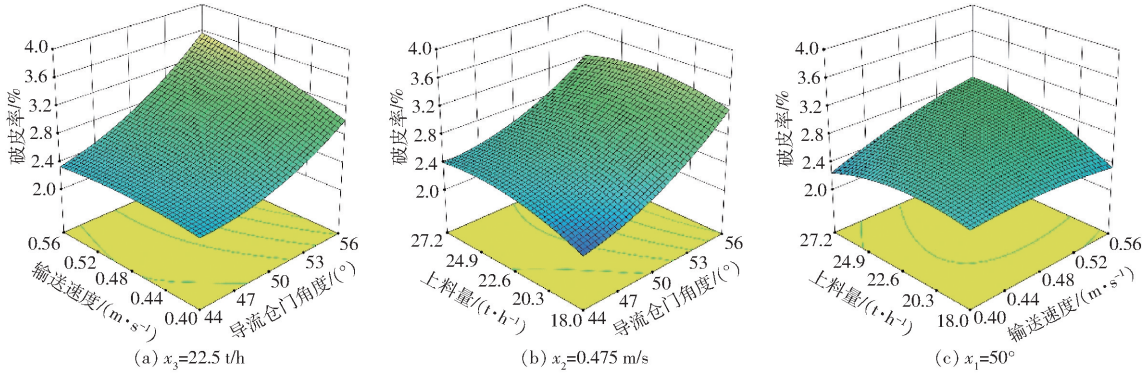
表 6 显示,对单口装袋效率的影响显著程度由大到小为 x_3、x_1^2、x_2、x_2^2、x_2x_3、x_3^2、x_1x_3、x_1、x_1x_2。其中 x_3对单口装袋效率影响极显著($P<0.01$);x_1^2 对伤薯率影响显著($0.01<P<0.05$);x_2、x_2^2 对单口装袋效率影响较显著($0.05<P<0.1$);其他因素对单口装袋效率影响不显著($P>0.1$),将不显著项删除后并重新进行拟合得实际值多元二次回归方程为

$$y_3=4.41-34.85x_2-0.72x_3-6.75\times10^{-3}x_1^2+36.83x_2^2 \quad (29)$$

3.5 试验结果响应面分析

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行响应面分析,以明晰各试验因素对试验指标的影响规律。

在交互效应中,交互项输送速度与导流仓门角度对破皮率影响显著,如图 8a 所示,上料量为 22.5 t/h,导流仓门角度较小时,破皮率随输送速度的增大先升高后降低,且输送速度越大,破皮率增大趋势越明显,分析其原因为输送速度的增大使薯群冲击力增大,造成破皮率的升高。当输送速度继续增大,由于此时导流仓门角度较小,薯块跃起运动方向与运输方向角度较大,致使部分薯块直接进入出料口,从而撞击率较小,破皮率轻微下降。



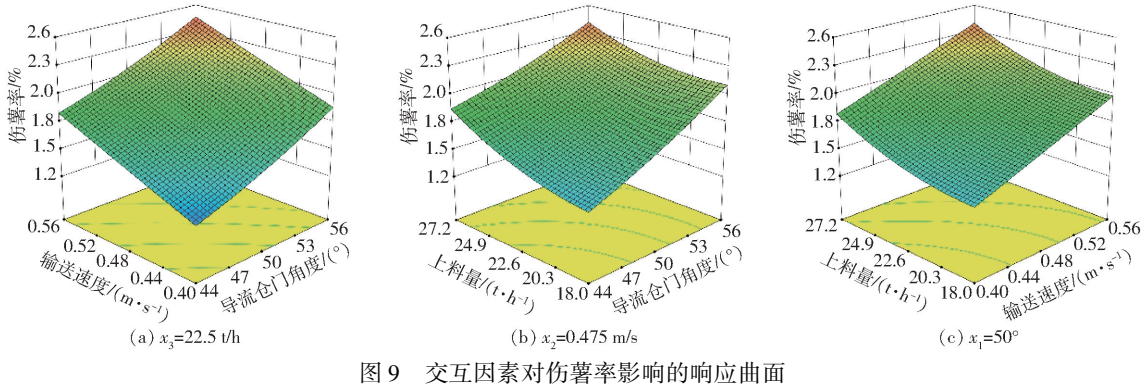
(a) x_3=22.5 t/h (b) x_2=0.475 m/s (c) x_1=50°

图 8 交互因素对破皮率影响的响应曲面

Fig. 8 Response surface diagrams of influence of interaction factors on breakage rate

输送速度与上料量交互项对破皮率影响极显著,如图 8c 所示,导流仓门角度为 50°,输送速度为一定值时(0.40~0.51 m/s),破皮率随上料量的增大先升高后降低,分析其原因为薯块在导流仓门处有轻微的翻滚现象,上料量较小时薯群冲击力较小,随着上料量的增大冲击力而增大,因此破皮率出现上升现象。而当上料量增大至一定值(约 24 t/h),薯块与导流仓门的撞击率减小,致使破皮率有轻微降低。输送速度较大时,破皮率随上料量增大而升高,分析其原因为输送速度较大时,薯块出现跃起现象,撞击率随之升高,因此破皮率呈逐渐升高趋势。

伤薯率的试验结果分析中,主要影响因素为主效应,伤薯率交互效应中仅 x_3^2 对伤薯率影响显著。如图 9 所示,导流仓门角度一定时,伤薯率随输送速



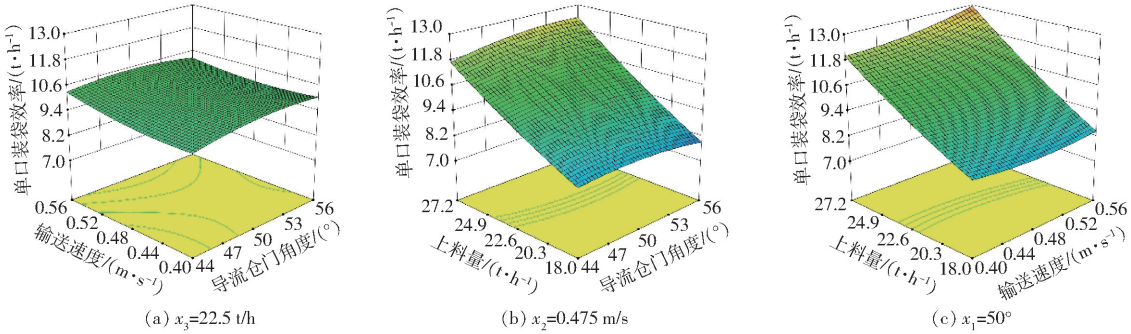
(a) x_3=22.5 t/h (b) x_2=0.475 m/s (c) x_1=50°

图 9 交互因素对伤薯率影响的响应曲面

Fig. 9 Response surface diagrams of influence of interactive factors on potato injury rate

度的增大呈增大趋势；输送速度一定时，伤薯率随导流仓门角度的增大呈增大趋势；输送速度一定时，伤薯率随上料量的增大呈增大趋势。

交互因素对单口装袋效率影响的响应面分析如图 10 所示，在交互效应中，无因素交互项对单口装袋效率影响显著，对单口装袋效率影响显著的交互项为 x_1^2，对单口装袋效率影响较显著的交互项为 x_2^2。



(a) x_3=22.5 t/h　　(b) x_2=0.475 m/s　　(c) x_1=50°

图 10　交互因素对单口装袋效率影响的响应曲面

Fig. 10　Response surface diagrams of influence of interaction factors on single-port bagging efficiency

3.6　参数优化

在约束条件下，利用 Design-Expert 8.0.6 软件参数优化模块对目标参数进行优化求解，选取最佳导流仓门角度、输送速度和上料量，以获得破皮率、伤薯率和单口装袋效率的较优值。根据用户对马铃薯装袋设备的基本需求，实际装袋过程中破皮率和伤薯率相较于单口装袋效率更为重要。为解决此问题，在 Design-Expert 8.0.6 优化模块中对各个指标重要程度进行设定，其中破皮率和伤薯率设定为“+ + + +”，单口装袋效率设定为“+ + +”。根据装袋实际工作情况以及分析结果得其优化求解约束条件为

$$\begin{cases} \min y_1(x_1,x_2,x_3) \\ \min y_2(x_1,x_2,x_3) \\ \max y_3(x_1,x_2,x_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 40° \leqslant x_1 \leqslant 60° \\ 0.35\ \text{m/s} \leqslant x_2 \leqslant 0.60\ \text{m/s} \\ 15\ \text{t/h} \leqslant x_3 \leqslant 30\ \text{t/h} \end{cases} \end{cases} \tag{30}$$

经过优化求解得到，当导流仓门角度为 44.98°，输送速度为 0.35 m/s，上料量为 26.75 t/h 时，马铃薯装袋机各指标为：破皮率 1.9%，伤薯率 1.4%，单口装袋效率为 11.4 t/h。

3.7　验证试验

为确保参数优化预测值的可靠性，根据实际工作情况及优化参数取导流仓门角度为 45°，输送速度为 0.35 m/s，上料量为 27 t/h，在二次回归正交旋转组合试验相同试验条件下，以理论预测最佳参数组合进行 5 次重复试验验证并取平均值，同时观察机器装袋运行状态。对试验结果统计显示，马铃薯定重装袋机破皮率为 1.8%，伤薯率为 1.4%，单口装袋效率为 12.4 t/h。对比原有马铃薯装袋机，该辊式导流马铃薯定重装袋机装袋过程薯块运行顺畅、无堆积现象、袋效率较高，马铃薯破皮率降低 5 个百分点，伤薯率降低 3 个百分点，试验场景如图 11 所示。



图 11　试验场景

Fig. 11　Test scenarios

4　结论

(1)设计了一种基于输送带的辊式导流马铃薯定重装袋机，实现了马铃薯的定重装袋，解决了原有马铃薯装袋机堆积和伤薯问题。

(2)利用 Design-Expert 8.0.6 软件建立了试验因素与指标关系的数学模型，通过方差分析得到破皮率和伤薯率的影响因素主次顺序均为导流仓门角度、输送速度、上料量，单口装袋效率的影响因素主次顺序为上料量、输送速度、导流仓门角度。通过响应面法分析阐述了交互效应对试验指标的影响规律。

(3)试验表明：当导流仓门角度为 45°、输送速度为 0.35 m/s、上料量为 27 t/h 时，破皮率为 1.8%，伤薯率为 1.4%，单口装袋效率为 12.4 t/h。在该参数组合下，马铃薯破皮率和伤薯率均较低，且装袋效率较高，满足用户装袋要求。

参　考　文　献

[1]　连文香. 4U－1400FD 型马铃薯联合收获机分级装袋装置及机架的研究与设计[D]. 兰州：甘肃农业大学，2010.

LIAN Wenxiang. The research and design of grading and bagging device and the fame of 4U－1400FD potato combine harvester [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010. (in Chinese)
[2] 刘金锁, 高波, 李洋, 等. 马铃薯薯种拌药及装袋装置设计与试验[J]. 农业工程, 2017, 7(5):117－120.
LIU Jinsuo, GAO Bo, LI Yang, et al. Design and experiment of potato seed dressing and bagging device[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(5): 117－120. (in Chinese)
[3] 胡周勋, 王相友, 李学强, 等. 一种简单实用的马铃薯装袋机: 201810262304.3[P]. 2018－03－28.
[4] 何昌俊, 王法明, 杨自栋, 等. 一种基于皮带运输机的马铃薯定重装袋机: 201811411984.7[P]. 2018－11－25.
[5] 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 Agcuitural Mechanization, 2019, 40(11): 27－34. (in Chinese)
[6] 魏忠彩, 李学强, 孙传祝, 等. 马铃薯收获与清选分级机械化伤薯因素分析[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(8): 63－70.
WEI Zhongcai, LI Xueqiang, SUN Chuanzhu, et al. Analysis of potato mechanical damage in harvesting and cleaning and sorting storage[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(8): 63－70. (in Chinese)
[7] 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)
[8] 吕金庆, 于佳钰, 冯雪, 等. 辊式马铃薯分级机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 323－332.
LÜ Jinqing, YU Jiayu, FENG Xue, et al. Design and experiment of roller potato grading machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 323－332. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190237&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.037. (in Chinese)
[9] 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)
[10] 陆世专, 杨辉, 游开明, 等. 小球与均质定轴杆的非完全弹性碰撞[J]. 衡阳师范学院学报, 2012, 33(3): 65－67.
LU Shizhuan, YANG Hui, YOU Kaiming, et al. The non-completely elastic collision of a pellet and a homogeneous fixed-spindle pole[J]. Journal of Hengyang Normal University, 2012, 33(3): 65－67. (in Chinese)
[11] 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)
[12] 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 cofefficient[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 93－100. (in Chinese)
[13] 杨海波. 弹性与塑性力学简明教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
[14] 王仲仁. 弹性与塑性力学基础[M].2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
[15] 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)
[16] 王君, 牛克佳, 聂良益, 等. 单自由度复杂平面连杆机构的奇异性分析[J]. 中国机械工程, 2018, 29(1): 36－40.
WANG Jun, NIU Kejia, NIE Liangyi, et al. Singularity analysis of single degree of freedom complex planar linkages[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(1): 36－40. (in Chinese)
[17] 邱宣怀, 郭可谦, 吴宗泽. 机械设计[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 1997.
[18] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 140－152. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190916&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.016. (in Chinese)
[19] 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)
[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] 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)
[22] 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)
[23] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014: 155－164.
[24] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.