

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.011

马铃薯挖掘机升运分离过程块茎损伤机理分析与试验

吕金庆 杨晓涵 吕伊宁 李紫辉 李季成 杜长霖

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对马铃薯挖掘机升运过程马铃薯块茎机械损伤严重的问题,通过对马铃薯升运过程进行运动学分析和撞击过程能量学分析,建立了损伤能量的数学模型,确定了影响马铃薯机械损伤的主要因素及各因素的试验取值范围。以损伤综合指数和伤薯率为评价指标,以跌落高度、二级升运链倾角和二级升运链线速度为试验因素,进行二次正交旋转回归试验,建立各指标与因素间的回归数学模型,分析各因素对评价指标的影响规律,根据回归模型进行参数优化。结果表明,当二级升运链线速度 1.42 m/s、二级升运链倾角 27°、跌落高度 220 mm 时,损伤综合指数为 0.43,伤薯率为 3.6%,明显低于未经参数优化的马铃薯挖掘机薯块机械损伤情况,满足马铃薯收获作业要求。

关键词: 马铃薯; 挖掘机; 升运分离; 机械损伤; 参数优化

中图分类号: S225.7⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)01-0103-11

OSID:



Analysis and Experiment of Potato Damage in Process of Lifting and Separating Potato Excavator

Lǚ Jinqing YANG Xiaohan Lǚ Yining LI Zihui LI Jicheng DU Changlin

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming at the serious mechanical damage of potato tuber during the lifting process of potato excavator, through the kinematic analysis of potato lifting process and the energy analysis method of potato and bar collision process, through the establishment of the mathematical model of damage energy in the process of lifting and separating, the main factors influencing the mechanical damage of potato during the lifting process are the drop height, lifting chain speed and the angle of the lifting chain. At the same time, the range of test values of main factors is determined. Taking the damage comprehensive index and the injury rate of potato as the evaluation index, taking the drop height, the inclination angle of the secondary lifting chain and the linear speed of the secondary lifting chain as the experimental factors, the quadratic orthogonal rotation regression test was carried out. The regression mathematical model between each index and factor was established, and the influence rule of each factor on the evaluation index was analyzed. According to the regression model, the parameters were optimized. When the linear speed of the lifting chain is 1.42 m/s, the lift angle is 27° and the drop height is 220 mm, the damage comprehensive index is 0.43, and the injury rate is 3.6%, which is significantly lower than the mechanical damage of potato block of potato excavator without parameter optimization, and meets the requirements of potato harvesting.

Key words: potato; excavator; lift separation; mechanical damage; parameter optimization

0 引言

马铃薯机械化收获是马铃薯全程机械化的关键环节,可大幅提高劳动效率、增产增收^[1]。目前,升

运链式马铃薯收获机因薯土混合物分离效果好、结构简单、稳定性好而被广泛使用。但在收获过程中,马铃薯块茎与升运分离装置碰撞造成的机械损伤也随之增加,严重影响收获后马铃薯的储存、销售等,

收稿日期: 2019-10-10 修回日期: 2019-11-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701600、2017YFD0700705)、现代农业产业技术体系建设专项(CARS-09-P23)和黑龙江省马铃薯产业技术协同创新推广体系项目

作者简介: 吕金庆(1970—),男,研究员,主要从事马铃薯田间技术与装备研究,E-mail: ljq88886666@163.com

进而直接影响其经济效益^[2-6],因此,如何减少马铃薯收获过程中块茎机械损伤成为亟待解决的问题。

国外对于马铃薯机械损伤的研究较早^[7-9],进行了大量的田间试验,并且结合人造动态测试球等高新技术,能够有效降低马铃薯机械损伤。国内学者桑永英等^[10]对马铃薯碰撞损伤进行试验研究,并进行有限元分析,建立了马铃薯碰撞模型;文献^[11-13]对马铃薯损伤机理进行了研究;张建华等^[14]进行了马铃薯块茎性状对块茎损伤的影响研究;张华等^[15]对机械收获中马铃薯损伤原因进行分析,并提出改进措施。国内学者对马铃薯损伤的研究多集中在马铃薯动态力学特性、损伤机理等方面,对收获过程中由升运分离装置碰撞所造成的机械损伤研究较少。马铃薯收获过程产生机械损伤主要与其工作参数配置不合理有关。

针对上述问题,本文对升运过程马铃薯损伤机理进行理论分析,明确影响马铃薯机械损伤的主要因素,并确定影响因素的试验取值范围,搭建试验台,进行马铃薯挖掘机升运分离装置优化试验,以期获得马铃薯挖掘机升运装置最优的工作参数组合。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

马铃薯升运分离装置试验台主要由一级升运装置驱动电机、一级升运装置、U形卡、二级升运装置、二级升运装置主驱动轮轴、机架、二级升运装置驱动电机等组成,其整体结构如图1所示。

1.2 工作原理和主要技术参数

1.2.1 工作原理

一级升运装置通过U形卡连接在机架上,工作时,一级升运装置在一级升运装置驱动电机的驱动下带动马铃薯向二级升运装置方向运动,当马铃薯运动到一级升运装置末端时,薯块被抛出,掉落至二级升运装置上,二级升运装置在二级升运装置驱动电机的驱动下产生线速度,同时带动马铃薯做斜抛运动,马铃薯在重力的作用下回落升运链。

1.2.2 主要技术参数

马铃薯机械损伤试验台主要用于马铃薯挖掘机升运过程中马铃薯块茎机械损伤试验,其主要参数如表1所示。

2 马铃薯升运分离碰撞过程机理分析

薯土混合物经挖掘铲挖起,由一级升运分离装置进行初步薯土混合物分离,随后运动到一级升运分离装置末端,被抛送至二级升运分离装置,在抖动器的作用下,薯块在链面上不断地被抛起落下,最后

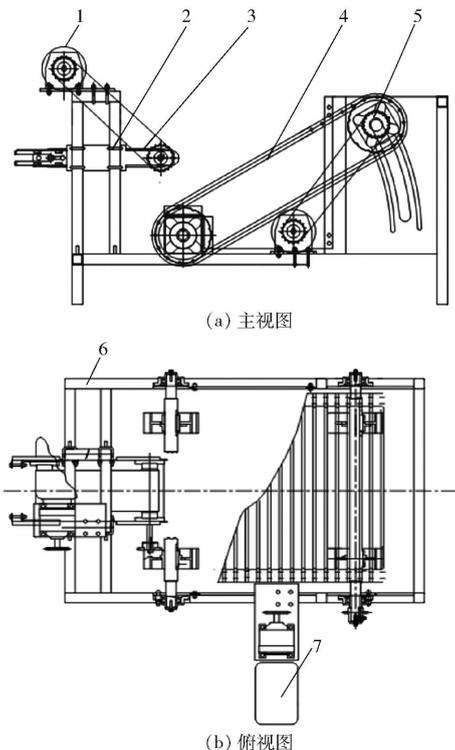


图1 马铃薯机械损伤试验台整体结构图

Fig.1 Integral structure diagrams of potato mechanical damage test-bed

1.一级升运装置驱动电机 2.U形卡 3.一级升运装置 4.二级升运装置 5.二级升运装置主驱动轮轴 6.机架 7.二级升运装置驱动电机

表1 马铃薯机械损伤试验台主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of potato mechanical damage test-bed

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	1 614×1 356×980
一级升运装置驱动电机功率(电压)/kW	0.75(380 V)
二级升运装置驱动电机功率(电压)/kW	0.75(380 V)
跌落高度可调整范围/mm	20~450
升运链线速度可调整范围/(m·s ⁻¹)	0~2.5
升运链倾角可调整范围/(°)	0~35
杆条间距/mm	33

在二级升运装置末端被抛送至地面^[16-18]。由以上分析可知,在薯块升运分离过程中发生碰撞继而产生损伤的时刻主要是:薯块在一级升运链末端被抛出与二级升运链杆条相碰撞;在二级升运分离装置上被抛起落下时与链面杆条碰撞;薯块在二级升运链末端被抛出与地面发生碰撞。因此薯块产生损伤过程可归结为薯块与杆条发生碰撞和薯块与平面发生碰撞,具体过程如图2所示。

2.1 抛落阶段运动学分析

2.1.1 薯块在升运链末端的抛落运动学分析

由上述可知,薯块产生损伤的时刻主要为薯块与杆条的撞击和薯块与地面的撞击。虽然薯块在第

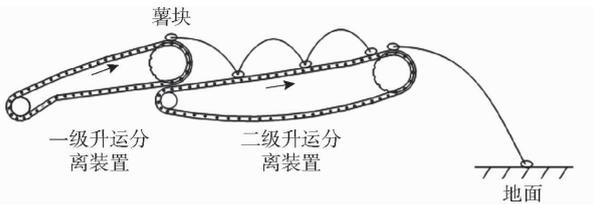


图 2 薯块运动过程示意图

Fig. 2 Schematic of potato block movement process

二级升运链上抛落至地面的跌落高度比薯块在一级升运装置抛落至二级升运装置的跌落高度大,但在二级升运链末端薯块所掉落至的地面为经挖掘和薯土分离后的土壤,土质较疏松,薯块与地面撞击产生的损伤相比于薯块与二级升运链撞击产生的损伤较小,因此本文对薯块与地面的碰撞不做分析,只选取薯块在一级升运链末端的运动做运动分析,运动过程分析图如图 3 所示。

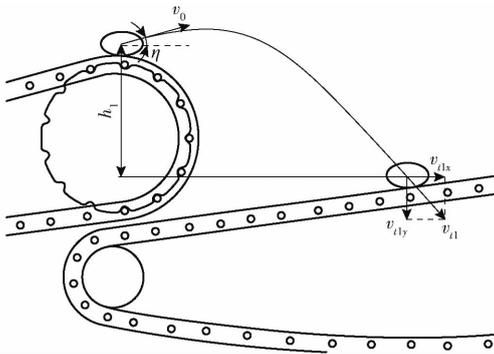


图 3 一级升运链末端抛薯运动分析

Fig. 3 Analysis of movement of the first-stage elevator chain

因一级升运链与地面存在一定夹角,薯块在一级升运链末端被抛出时速度方向沿一级升运链线速度方向,竖直方向先做匀减速运动,到达最高点后做匀加速直线运动至与杆条碰撞,其竖直上升最大高度为

$$h_0 = \frac{v_0^2 \sin^2 \eta}{2g} \quad (1)$$

式中 v_0 ——薯块由一级升运链末端抛出速度, m/s
 η ——一级升运链与地面夹角, ($^\circ$)
 g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2
 h_0 ——薯块上升高度, mm

马铃薯挖掘机一级升运链倾角一般为 $22^\circ \sim 34^\circ$, 本文取 25° , 一级升运链线速度一般为 $1.6 \sim 2.0 \text{ m/s}$, 本文取 1.8 m/s , 代入式(1)计算得马铃薯被抛出后上升高度 h_0 为 3 mm 。

薯块上升至最大高度后在重力作用下下落,薯块与杆条发生碰撞竖直方向速度为

$$v_{i1y} = \frac{\sqrt{2g(3 + h_1)}}{10} \quad (2)$$

式中 h_1 ——薯块从一级升运链末端跌落高度, mm
薯块在水平方向做匀速直线运动,则薯块与杆条碰撞水平方向速度为

$$v_{i1x} = v_0 \cos \eta \quad (3)$$

经计算得 $v_{i1x} = 1.63 \text{ m/s}$ 。

薯块最终与杆条碰撞速度为

$$v_{i1} = \sqrt{v_{i1x}^2 + v_{i1y}^2} = \sqrt{3.25 + 0.196h_1} \quad (4)$$

2.1.2 薯块在二级升运链的抛落运动学分析

马铃薯在二级升运链上的运动过程中,将链面视为平面,并将马铃薯块茎视为质点,忽略薯块在这一过程中发生的滚动以及空气阻力对薯块的影响。将被抛起至回落过程的运动视为与薯块被抛起前的运动处于同一平面,此过程薯块的运动轨迹示意图如图 4 所示。

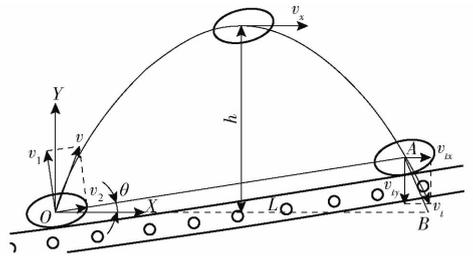


图 4 薯块的抛起输送过程运动学分析

Fig. 4 Kinematics analysis of process of throwing and conveying potato chips

以机架为参考对象,以薯块刚与二级升运链脱离瞬间薯块质心点为坐标系原点 O ,水平向右方向为 X 轴正向,竖直向上方向为 Y 轴正向建立直角坐标系。 v_{ix} 和 v_{iy} 分别为薯块与杆条薯块在二级升运链上被抛起掉落时与杆条碰撞速度的水平分速度和竖直分速度;薯块斜抛运动速度表达为

$$\begin{cases} v_x = v_2 \cos \theta - v_1 \sin \theta \\ v_y = v_2 \sin \theta + v_1 \cos \theta - gt \end{cases} \quad (5)$$

式中 v_x ——薯块斜抛运动过程水平方向速度, m/s
 v_y ——薯块斜抛运动过程竖直方向速度, m/s
 v_1 ——薯块受抖动器作用产生的垂直于升运链平面的速度, m/s
 v_2 ——二级升运链线速度, m/s
 t ——薯块斜抛运动时间, s
 θ ——升运链平面与 X 轴夹角, ($^\circ$)

水平及竖直方向位移表达式为

$$\begin{cases} f_x = v_x t \\ f_y = (v_2 \sin \theta + v_1 \cos \theta) t - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (6)$$

在 t_1 时刻薯块到达最大抛起高度,此时 $v_y = 0$, 其被抛起最大高度为

$$h_{\max} = \frac{(v_2 \sin \theta + v_1 \cos \theta)^2}{2g} \quad (7)$$

此后薯块在竖直方向上做匀加速运动,直至在 t_2 时刻落到升运链平面上,因升运链平面与水平面呈一定角度,其落点位置如图4所示。

当竖直位移 $f_y = 0$ 时,薯块最大水平位移为

$$L_{\max} = \frac{2v_x(v_2 \sin\theta + v_1 \cos\theta)}{g} \quad (8)$$

为了方便计算,近似将 $\angle OAB$ 视为直角,则 OA 间竖直位移为

$$h_{OA} = \frac{2v_x \sin\theta \cos\theta (v_2 \sin\theta + v_1 \cos\theta)}{g} \quad (9)$$

在接触时刻 t_2 ,碰撞速度表达式为

$$v_t = \sqrt{2g(h_{\max} - h_{OA}) + (v_2 \cos\theta - v_1 \sin\theta)^2} \quad (10)$$

由式(10)可知,在薯块受抖荡器作用产生的垂直于升运链平面的速度一定时,马铃薯与杆条碰撞速度主要与二级升运链线速度、二级升运链倾角有关。为了保证薯土混合物分离输送顺畅,不发生堵塞情况,升运链线速度 v_2 应略大于机器前进速度 v_p ^[19],即

$$v_p = \lambda v_2 \quad (11)$$

式中 λ ——速比,一般取0.8~2.5,本文取0.8

马铃薯挖掘机机具前进速度一般为0.8~1.8 m/s,根据式(11)可得二级升运链线速度范围为1.0~2.25 m/s,考虑到实际调节准确性,将线速度取值上限取整处理,最终二级升运链线速度取值范围选定为1.0~2.2 m/s。

2.2 撞击阶段能量学分析

薯块撞击过程分为两个阶段:首先是开始与杆条接触时发生压缩变形,当薯块局部应力达到材料屈服极限时,弹性变形阶段结束;薯块继续向下冲击,发生塑性变形,当薯块速度降低为零时,弹塑性变形阶段结束;此时薯块局部产生最大变形量,随后薯块发生回弹,弹性势能转化为动能,薯块产生的加速度使之与撞击物体分离,该阶段为回弹卸荷阶段^[20-24]。

两物体碰撞时有两种分类:正碰和斜碰。正碰指相互撞击两物体初速度方向与两物体中心连线方向共线;斜碰是指初速度方向和两球心连线方向不共线;在实际碰撞发生时,正碰是斜碰的一个特例,斜碰是更为普遍的现象,尤其是大角度碰撞过程中,摩擦力的作用十分明显,所以在碰撞过程中不能忽略摩擦对损伤的影响。

马铃薯作为弹塑性体,薯块的塑性变形是撞击产生损伤的主要控制阶段。法向塑性变形与切向摩擦是撞击过程中能量损失最主要部分,也是回弹系数小于1的原因^[25]。

2.2.1 薯块与杆条撞击法向加载过程能量分析

薯块法向加载过程如图5所示,位置1为薯块

刚与杆条接触瞬间,随着薯块沿其速度方向的运动,杆条与薯块产生的冲击力逐渐加大,薯块开始发生弹性形变,到达位置2时,达到弹性变形最大压缩量。

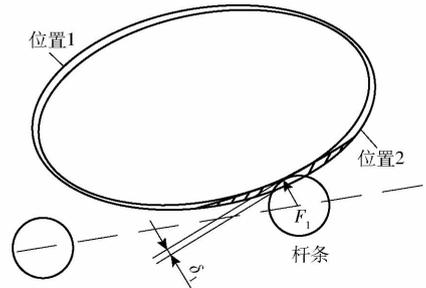


图5 法向加载过程示意图

Fig. 5 Schematic of normal loading process

根据接触力学,载荷与压缩变形量的关系为

$$F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

式中 F ——接触载荷, N

E^* ——综合弹性模量, MPa

R^* ——压缩等效半径, mm

δ ——压缩变形量, mm

综合弹性模量为

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \quad (13)$$

式中 E_1 ——马铃薯弹性模量

E_2 ——杆条弹性模量

μ_1 ——马铃薯泊松比

μ_2 ——杆条泊松比

马铃薯弹性模量为 4.15×10^6 Pa,泊松比为0.57^[26];本文杆条材料选用65Mn钢,查阅《机械设计手册》^[27],杆条弹性模量为 2.1×10^{11} Pa,泊松比为0.3,代入式(13)计算可得,综合弹性模量为0.17 MPa。

压缩等效半径为

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (14)$$

式中 R_1 ——薯块短轴半径, mm

R_2 ——杆条半径, mm

经实际测量后取平均值,可得薯块短轴半径为23 mm;查阅《农业机械手册》^[28],马铃薯挖掘机升运链半径一般为6 mm,代入式(14)计算可得,压缩等效半径为4.8 mm。

弹塑性材料屈服应力与压缩变形量之间的关系为

$$\begin{cases} \delta_y = (C\sigma_y)^2 \left(\frac{\pi\sqrt{R^*}}{2E^*} \right)^2 \\ C = \min(1.295e^{0.763\mu_1}, 1.295e^{0.763\mu_2}) \end{cases} \quad (15)$$

式中 δ_y ——薯块屈服变形量, mm

σ_y ——薯块屈服应力, Pa

C ——系数, 经计算为 1.59

将式(15)代入式(12)得薯块屈服压力为

$$F_1 = \frac{R^{*2}(\pi C \sigma_y)^3}{6E^{*2}} \quad (16)$$

屈服时屈服压力做功为

$$W_1 = \frac{R^{*3}(\pi C \sigma_y)^5}{24E^{*4}} \quad (17)$$

2.2.2 薯块与杆条撞击切向冲击过程能量分析

由于大多数情况下薯块与杆条发生碰撞时速度方向不共线, 薯块与杆条发生的碰撞属于斜碰^[29-33]。考虑到马铃薯与杆条碰撞属于低速碰撞, 因此假设切向力近似等于摩擦力, 薯块在位置1时与杆条接触于C, 当薯块与杆条相对运动到位置2时, C点运动到D点, l_{CD} 即为薯块运动距离, 马铃薯与杆条斜碰过程如图6所示。

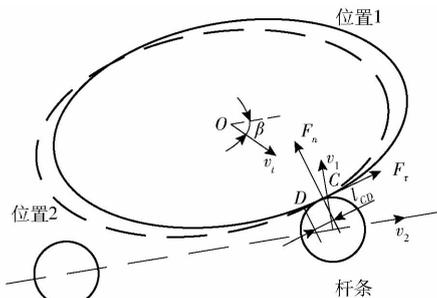


图6 马铃薯与杆条斜碰分析图

Fig. 6 Diagram of oblique collision between potatoes and bars

切向力表达式为

$$F_\tau = \begin{cases} kF_n \frac{\beta}{\alpha} & \left(\frac{\beta}{\alpha} \leq 1 \right) \\ kF_n & \left(\frac{\beta}{\alpha} > 1 \right) \end{cases} \quad (18)$$

式中 β ——薯块初始入射角, ($^\circ$)

α ——黏滞与滑动的临界摩擦角, ($^\circ$)

F_n ——薯块所受杆条支持力, N

k ——薯块与杆条间摩擦因数, 本文取 0.269

当 $\beta/\alpha \leq 1$ 时, 接触区间无相对运动趋势, 在整个撞击过程中不存在微滑和滑动, 当 $\beta/\alpha > 1$ 时, 接触区发生滑动, 即产生摩擦力。

因薯块与杆条发生斜碰时, 初始入射角与临界摩擦角比值大于 1, 会发生滑动现象。

薯块初始入射角 β 在 $0 \sim 90^\circ$ 之间, 本文取 45° 进行计算, 则薯块所受切向力为

$$F_\tau = \frac{\sqrt{2}mkv_t}{t'} \quad (19)$$

式中 m ——薯块质量, kg

t' ——薯块与杆条接触时间, s

薯块与杆条接触滑动位移为

$$l_\tau = \sqrt{2}v_t t' \quad (20)$$

则切向力做功为

$$W_2 = 2emkv_t^2 \quad (21)$$

式中 e ——切向力恢复系数, 处于 $0 \sim 1$ 之间

根据薯块与杆条撞击时运动的两个阶段可知, 薯块撞击杆条的动能转化为: 薯块发生弹性变形所做的功、切向摩擦力所做的功和薯块产生塑性变形即产生损伤的能量。

根据能量守恒定律, 薯块产生损伤的能量为

$$W_q = \frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{R^{*3}(\pi C \sigma_y)^5}{24E^{*4}} - 2emkv_t^2 \quad (22)$$

综上所述, 在薯块质量、力学特性、一级升运链线速度、杆条的半径、材料、力学特性、升运链平面抖动速度等因素确定时, 薯块与杆条碰撞产生机械损伤的主要影响因素为薯块与杆条撞击速度。

薯块与杆条撞击若不产生损伤, 则应尽量使 W_q 趋近于 0, 即尽可能满足

$$v_t \leq \frac{1}{2E^{*2}} \sqrt{\frac{R^{*3}(\pi C \sigma_y)^5}{(3-3.228e)m}} \quad (23)$$

由式(4)、(10)可知, 薯块与杆条撞击速度 v_t 与跌落高度 h 、升运链线速度 v_2 、二级升运链倾角 θ 有关。收获期马铃薯质量 m 为 $100 \sim 400$ g, 恢复系数 e 为 $0.58 \sim 0.72$; 查阅文献可知, 二级升运链倾角一般为 $18^\circ \sim 27^\circ$, 较大的倾角可提高升运分离效率, 较小的倾角可降低薯块抛起高度, 为了更好地探究升运链倾角对马铃薯机械损伤的影响, 适当扩大升运链倾角选取范围, 试验取值范围确定为 $16^\circ \sim 30^\circ$; 确定马铃薯跌落高度取值范围时, 应兼顾机器安装位置及一级升运链分离效果, 跌落高度较低虽然有利于降低马铃薯损伤, 但会导致一级升运链倾角减小, 一级升运分离效果不好, 不利于整机综合性能的提升。根据上文分析和式(11)理论计算结果, 选取升运链线速度试验取值范围为 $1.0 \sim 2.2$ m/s; 升运链倾角试验取值范围为 $16^\circ \sim 30^\circ$; 跌落高度试验取值范围为 $200 \sim 400$ mm。

3 试验及结果分析

3.1 试验材料与装置

试验于 2018 年 10 月进行, 试验地点为东北农业大学北方马铃薯全程机械化试验基地。选择收获 3 d 之内的尤金 885 为试验用种, 试验所用马铃薯均无内部损伤和外部可见损伤, 单颗种薯平均长、宽、厚为 83.47、62.65、55.25 mm, 平均形状指数为 0.797, 顶部平均曲率半径 18.53 mm, 中部平均曲率

半径 43.22 mm,底部平均曲率半径 19.41 mm,马铃薯质量范围为 100 ~ 400 g,平均含水率 73.2%。利用马铃薯机械损伤试验台进行试验,试验过程如图 7 所示。



图 7 试验过程

Fig. 7 Test process

3.2 评价指标与测量方法

3.2.1 评价指标

参考 SB/T 10968—2013《加工用马铃薯流通规范》,根据实际情况将薯块损伤分为内部损伤、破裂伤和表皮严重擦伤。本试验采用变色灰度增加值、纹理裂开长度、表皮损伤面积来评价各级损伤。为了对单个薯块各级损伤程度进行综合评价,对以上 3 种测量结果进行权重分配,由于不同评价指标之间的量纲不同,首先需要对所有测量值进行无量纲化处理

$$X'_m = \frac{|X_m(k) - \bar{X}_m|}{\psi_m} \quad (24)$$

式中 $X_m(k)$ ——评价指标 m 中第 k 个元素的原始数据

\bar{X}_m ——同一评价指标的平均值

ψ_m ——同一评价指标的标准差

损伤综合指数^[34]计算方法为

$$I = 0.25X'_s + 0.35X'_k + 0.4X'_l \quad (25)$$

式中 X'_s ——无量纲化处理后表皮擦伤面积

X'_k ——无量纲化处理后变色灰度增加值

X'_l ——无量纲化处理后纹理裂开长度

伤薯率计算公式为

$$N = \frac{n_i}{n} \times 100\% \quad (26)$$

式中 n_i ——产生损伤薯块个数

n ——试验薯块总个数

以损伤综合指数和伤薯率作为马铃薯机械损伤试验评价指标。

3.2.2 测量方法

损伤综合指数计算中各数值具体采集方法如下:试验后需对损伤薯块进行初步分类和处理,将有

外部损伤薯块在室温(20 ~ 26℃)中静置 48 h,使用 ScanTech HSCAN331 型手持式激光三维扫描仪对外部损伤块茎进行扫描,将采集的块茎点云数据导入 Geomagic StuIo 进行封装,将受损表皮圈出后使用计算工具对表皮损伤面积进行分析;将有内部损伤块茎切片, -30℃ 冷冻 3 h 后解冻处理,使用 SONY DSC-H50 型相机对变色区域进行拍照处理,在 Adobe Photoshop CS6 中计算变色灰度增加值;将产生开裂损伤的薯块沿裂缝滴入黑色墨水后切开,使用精度为 0.02 mm 的游标卡尺对裂缝深度进行测量;将以上所测得值根据式(25)换算为损伤综合指数。测量过程如图 8 所示。



图 8 测量过程

Fig. 8 Measurement process

3.3 试验方案与结果分析

3.3.1 试验方案与结果

采用二次旋转正交组合试验设计方法安排试验,以跌落高度 200 ~ 400 mm、二级升运链线速度 1.0 ~ 2.2 m/s 和二级升运链倾角 16° ~ 30° 为试验因素;以损伤综合指数和伤薯率为试验指标。试验时,可通过调节一级升运装置在机架上的安装高度来调节马铃薯跌落至升运链的跌落高度;通过调节升运链驱动电机的转速能够调节升运链线速度;通过调节升运链主驱动轮轴在机架上的安装位置调节升运链倾角。通过试验结果对影响试验指标的因素进行显著性分析,根据实际需求及前文中确定的参数范围,对各参数组合进行优化,最终获得较合适的各因素组合。试验因素编码如表 2 所示,试验方案及结果如表 3 所示。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factors codes

编码	试验因素		
	跌落高度 x_1/mm	二级升运链倾角 $x_2/(\text{°})$	二级升运链线速度 $x_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1. 682	400. 0	30. 0	2. 20
1	359. 5	27. 2	1. 96
0	300. 0	23. 0	1. 60
-1	240. 5	18. 8	1. 24
-1. 682	200. 0	16. 0	1. 00

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Test plan and experimental data

序号	试验因素			损伤综合 指数 I	伤薯率 $N/\%$
	x_1/mm	$x_2/(\text{°})$	$x_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		
1	240.5	18.8	1.2	0.55	3.7
2	359.5	18.8	1.2	0.80	6.8
3	240.5	27.2	1.2	0.26	2.6
4	359.5	27.2	1.2	0.80	4.7
5	240.5	18.8	2.0	0.65	4.7
6	359.5	18.8	2.0	1.10	7.4
7	240.5	27.2	2.0	0.60	4.3
8	359.5	27.2	2.0	1.23	9.3
9	200.0	23.0	1.6	0.39	2.9
10	400.0	23.0	1.6	1.20	8.0
11	300.0	16.0	1.6	0.95	7.1
12	300.0	30.0	1.6	0.70	5.3
13	300.0	23.0	1.0	0.53	3.9
14	300.0	23.0	2.2	0.84	6.3
15	300.0	23.0	1.6	0.99	7.5
16	300.0	23.0	1.6	1.02	7.7
17	300.0	23.0	1.6	1.10	8.3
18	300.0	23.0	1.6	0.88	6.6
19	300.0	23.0	1.6	0.97	7.3
20	300.0	23.0	1.6	0.90	6.8
21	300.0	23.0	1.6	1.01	7.5
22	300.0	23.0	1.6	0.94	7.0
23	300.0	23.0	1.6	1.06	7.9

3.3.2 结果分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析,并进行多元回归拟合^[35-36],得到损伤综合指数 I 和伤薯率 N 回归方程,并进行显著性检验。

(1) 损伤综合指数 I 回归模型的建立与显著性分析

通过对试验数据的分析和拟合,损伤综合指数 I 方差分析如表 4 所示。由表 4 可知,对于试验指标损伤综合指数 I ,因素和因素间的交互作用影响的主次顺序是 $x_1, x_3, x_3^2, x_1^2, x_2^2, x_2, x_1x_2, x_2x_3, x_1x_3$; 其中 $x_1, x_3, x_1^2, x_2^2, x_3^2$ 对损伤综合指数 I 的影响极显著 ($P < 0.01$); x_2, x_1x_2 对损伤综合指数 I 的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$); x_2x_3 对损伤综合指数 I 的影响较显著 ($0.05 < P < 0.1$); 其余因素对试验指标损伤综合指数 I 的影响不显著 ($P > 0.1$)。其中不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项,再次进行方差分析,结果如表 4 所示。得到各因素对损伤综合指数 I 影响的回归方程

$$I = -3.02506 + 0.010214x_1 + 0.025924x_2 + 1.82825x_3 + 0.000235094x_1x_2 + 0.027530x_2x_3 - 0.0000194054x_1^2 - 0.00329328x_2^2 - 0.67244x_3^2 \quad (27)$$

对上述回归方程进行失拟检验,结果如表 4 所示,失拟项 $P = 0.5059$,不显著 ($P > 0.1$),证明不存在其他影响试验指标的主要因素。试验指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。

(2) 伤薯率 N 回归方程的建立与显著性检验

通过对试验数据的分析和多元回归拟合,试验指标伤薯率 N 方差分析如表 5 所示。由表 5 可知,对于试验指标伤薯率 N ,因素影响的主次顺序是 $x_1, x_3, x_3^2, x_1^2, x_2^2, x_2x_3, x_2, x_1x_3, x_1x_2$, 其中 $x_1, x_3, x_2x_3, x_1^2, x_2^2, x_3^2$ 对伤薯率 N 的影响极显著 ($P < 0.01$); x_2 对伤薯率 N 的影响较显著 ($0.01 < P < 0.05$); 其余因素对试验指标伤薯率 N 的影响不显著 ($P > 0.1$)。将

表 4 损伤综合指数 I 方差分析

Tab. 4 Variance analysis for damage comprehensive index

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1.37/1.36	9/8	0.15/0.17	32.71/33.50	<0.0001*** / <0.0001***
x_1	0.76/0.76	1/1	0.76/0.76	164.70/151.07	<0.0001*** / <0.0001***
x_2	0.029/0.029	1/1	0.029/0.029	6.27/5.75	0.0264** / 0.0310**
x_3	0.21/0.21	1/1	0.21/0.21	45.10/41.36	<0.0001*** / <0.0001***
x_1x_2	0.028/0.028	1/1	0.028/0.028	5.94/5.45	0.0299** / 0.0349**
x_1x_3	0.011	1	0.011	2.26	0.1564
x_2x_3	0.017/0.017	1/1	0.017/0.017	3.68/3.38	0.0772* / 0.0873*
x_1^2	0.075/0.075	1/1	0.075/0.075	16.15/14.81	0.0015*** / 0.0018***
x_2^2	0.054/0.054	1/1	0.054/0.054	11.54/10.59	0.0048*** / 0.0058***
x_3^2	0.18/0.18	1/1	0.18/0.18	39.60/36.32	0.0001*** / <0.0001***
残差	0.060/0.071	13/14	0.004645/0.005064		
失拟	0.019/0.030	5/6	0.003832/0.004946	0.74/0.96	0.6124/0.5059
总和	1.43/1.43	22/22			

注:“/”后数字为剔除不显著因素后损伤综合指数方差分析结果;***表示极显著($P < 0.01$);**表示显著($0.01 < P < 0.05$);*表示较显著($0.05 < P < 0.1$),下同。

表5 伤薯率 N 方差分析
Tab.5 Variance analysis for injury rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	77.29/76.35	9/7	8.559/10.91	24.37/29.62	<0.000 1*** / <0.000 1***
x_1	36.78/36.78	1/1	36.78/36.78	104.37/99.88	<0.000 1*** / <0.000 1***
x_2	1.92/1.92	1/1	1.92/1.92	5.46/5.23	0.036 1** / 0.037 2**
x_3	11.45/11.45	1/1	11.45/11.45	32.49/31.09	<0.000 1*** / <0.000 1***
$x_1 x_2$	0.28	1	0.28	0.80	0.387 9
$x_1 x_3$	0.66	1	0.66	1.88	0.194 0
$x_2 x_3$	3.25/3.25	1/1	3.25/3.25	9.22/8.83	0.009 5*** / 0.009 5***
x_1^2	8.21/8.21	1/1	8.21/8.21	23.29/22.28	0.000 3*** / 0.000 3***
x_2^2	3.27/3.27	1/1	3.27/3.27	9.27/8.87	0.009 4*** / 0.009 4***
x_3^2	11.75/11.75	1/1	11.75/11.75	33.35/31.92	<0.000 1*** / <0.000 1***
残差	4.58/5.52	13/15	0.35/0.37		
失拟	2.12/3.06	5/7	0.42/0.44	1.38/1.42	0.326 8/0.315 0
总和	81.87/81.87	22/22			

不显著的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项,而后再进行方差分析,结果如表5所示。得到各因素对伤薯率 N 影响的回归方程

$$N = -33.80309 + 0.14938x_1 + 0.48609x_2 + 10.76329x_3 + 0.37946x_2x_3 - 0.000203001x_1^2 - 0.025709x_2^2 - 5.37560x_3^2 \quad (28)$$

对上述回归方程进行失拟性检验,如表5所示,其中 $P=0.3150$,不显著 ($P>0.1$),证明不存在其

他影响指标的主要因素,试验指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。

3.3.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据的处理,得出跌落高度 x_1 、二级升运链倾角 x_2 、二级升运链线速度 x_3 之间的显著和较显著交互作用对损伤综合指数 I 、伤薯率 N 两个试验指标影响的响应曲面,如图9所示。

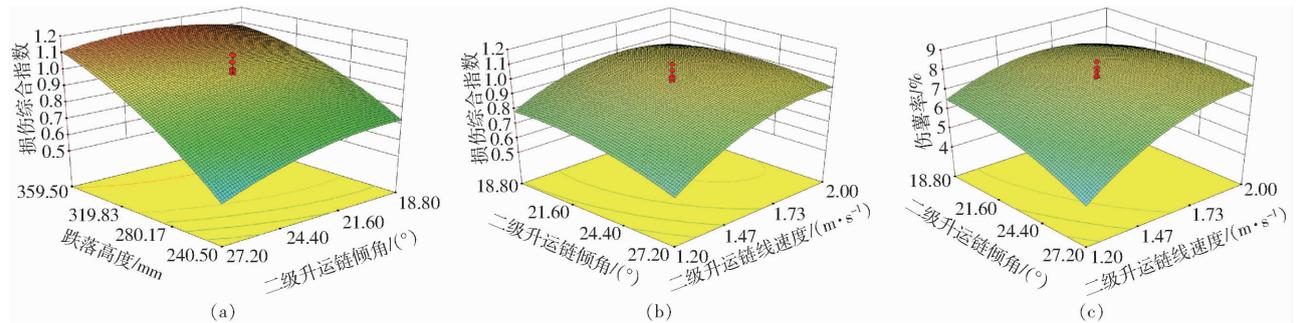


图9 损伤综合指数和伤薯率的双因素响应曲面

Fig.9 Response surfaces of double parameters about damage composite index and damage potato rate

如图9a所示,跌落高度一定时,损伤综合指数随着二级升运链倾角的增加呈逐渐减小趋势,最优的二级升运链倾角范围为 $21.6^\circ \sim 27.2^\circ$;当二级升运链倾角一定时,损伤综合指数与跌落高度成正相关,最优的跌落高度在 $240.5 \sim 302.6$ mm 范围内,其中,跌落高度是影响损伤综合指数的主要试验因素。

如图9b所示,当二级升运链倾角一定时,损伤综合指数整体上随着二级升运链线速度的增加呈现逐渐增加趋势,最优的二级升运链线速度范围为 $1.2 \sim 1.6$ m/s;当二级升运链线速度一定时,损伤综合指数整体上与二级升运链倾角成负相关,最佳的二级升运链倾角范围为 $22.4^\circ \sim 27.2^\circ$,其中,二级升运链线速度是影响损伤综合指数的主要试验

因素。

如图9c所示,当二级升运链倾角一定时,伤薯率整体上随着二级升运链线速度的增加呈现逐渐增加趋势,最优的二级升运链线速度范围为 $1.2 \sim 1.5$ m/s;当二级升运链线速度一定时,伤薯率整体上与二级升运链倾角成负相关,最佳的二级升运链倾角范围为 $23.3^\circ \sim 27.2^\circ$,其中,二级升运链线速度是影响伤薯率的主要试验因素。

3.3.4 参数优化

通过对图9中3个响应曲面的分析,得到最佳的试验因素水平组合,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对3个回归模型进行求解,根据马铃薯挖掘机收获作业的实际工作条件、作业性

能要求及上述相关模型分析结果,选择优化约束条件为

$$\begin{cases} \min I(x_1, x_2, x_3) \\ \min N(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 219.5 \text{ mm} \leq x_1 \leq 302.6 \text{ mm} \\ 23.3^\circ \leq x_2 \leq 27.2^\circ \\ 1.2 \text{ m/s} \leq x_3 \leq 1.5 \text{ m/s} \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

通过优化求解,得到跌落高度为 220 ~ 290 mm、二级升运链线速度为 1.32 ~ 1.45 m/s、二级升运链倾角为 25° ~ 27° 时,升运分离装置导致马铃薯机械损伤最小,损伤综合指数为 0.23 ~ 0.52,伤薯率为 2.6% ~ 4.2%。

3.4 田间验证试验

田间验证试验的测试方法与正交试验相同,比较经过优化调节参数后的损伤综合指数和伤薯率与未经优化调节参数的损伤综合指数和伤薯率之间的差异,进而验证参数优化后升运链式马铃薯挖掘机升运分离装置的减损效果。

分别以传统马铃薯挖掘机升运分离装置的作业参数:升运链线速度 1.6 m/s、升运链倾角 18°、跌落高度 260 mm,优化后并考虑实际加工及作业情况得到的马铃薯挖掘机升运分离装置的作业参数:二级升运链线速度 1.42 m/s、二级升运链倾角 27°、跌落高度 220 mm 进行试验。试验过程如图 10 所示,对试验结果进行分析统计,试验结果为马铃薯挖掘机采用传统升运链参数工作时,薯块损伤综合指数为 1.06、伤薯率为 7.3%;马铃薯挖掘机采用优化升运链参数工作时,薯块损伤综合指数为 0.43、伤薯率为 3.6%。

田间试验中薯块有土壤包裹,对薯块在一定程度上起到保护作用,升运分离过程中薯块损伤情况应少于试验台试验薯块损伤情况,田间试验结果会与试验台试验结果存在一定误差。本文田间试验区土壤为沙质土壤,在一级升运链上土壤与薯块基本分离完成,故薯块在二级升运分离装置上的损伤情



图 10 田间验证试验

Fig. 10 Process of field validation test

况与试验台试验薯块损伤情况基本一致。

优化后的马铃薯挖掘机作业参数下的马铃薯升运过程块茎机械损伤情况明显低于传统马铃薯挖掘机作业参数下的马铃薯升运过程块茎机械损伤情况。验证试验表明相关优化组合合理,按优化参数调节后的马铃薯挖掘机升运分离装置可有效降低马铃薯升运过程中机械损伤情况。

4 结论

(1)通过对马铃薯升运过程的运动学分析和马铃薯与杆条碰撞过程的能量学分析,以及对升运分离过程中损伤能量数学模型的建立,得出了影响升运过程中马铃薯机械损伤的主要因素为跌落高度、二级升运链线速度和二级升运链倾角。设计了马铃薯机械损伤试验台进行二次正交旋转组合试验,对马铃薯挖掘机进行了工作参数优化,有效减少了升运过程马铃薯损伤。

(2)进行马铃薯机械损伤试验台试验,建立了各试验指标与影响因素间的回归数学模型,并根据回归模型进行参数优化,试验结果表明:当二级升运链线速度为 1.42 m/s、二级升运链倾角为 27°、跌落高度为 220 mm 时,损伤综合指数为 0.43,伤薯率为 3.6%,明显低于未经参数优化马铃薯挖掘机薯块机械损伤情况,满足马铃薯收获作业要求。

参 考 文 献

- [1] 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 马铃薯机械发展现状、存在问题及发展趋势[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 258 - 263. LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. The development situation, existing problems and development trend of potato machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 258 - 263. (in Chinese)
- [2] 王公仆,蒋金琳,田艳清,等. 马铃薯机械收获技术现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 11 - 15. WANG Gongpu, JIANG Jinlin, TIAN Yanqing, et al. Present status and prospects of mechanical potato harvest technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 11 - 15. (in Chinese)
- [3] 史明明,魏宏安,刘星,等. 国内外马铃薯收获机械发展现状[J]. 农机化研究, 2013, 35(10): 213 - 218. SHI Mingming, WEI Hongan, LIU Xing, et al. The present situation of potato harvester development at home and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(10): 213 - 218. (in Chinese)
- [4] 康璟,李涛,王蒂,等. 马铃薯收获中机械损伤的分析与思考[J]. 农业机械, 2013(10): 137 - 139.

- [5] 吕金庆,王鹏榕,刘志峰,等. 马铃薯收获机薯秧分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(6):100-109.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, LIU Zhifeng, et al. Design and experiment of potato harvester potato stem separation equipment [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 100-109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190611&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.011. (in Chinese)
- [6] 吕金庆,孙贺,兑瀚,等. 粘重土壤下马铃薯挖掘机分离输送装置改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):146-155.
LÜ Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):146-155. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171118&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018. (in Chinese)
- [7] ALVAREZ M D, CANET W. Storage time effect on the rheology of refrigerated potato tissue[J]. European Food Research Technology, 2000, 212(1): 48-56.
- [8] SCANLON M G, LONG A E. Fracture strengths of potato tissue under compression and tension at two rates of loading[J]. Food Research International, 1995, 28(4): 397-402.
- [9] PETERS R. Damage of potato tubers, a review[J]. Potato Research, 1996, 39: 479-484.
- [10] 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,2008,13(1):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, 13(1): 81-84. (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] 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)
- [13] 胡奔. 马铃薯跌落损伤机理与防损伤装置研究[D]. 成都:西华大学,2018.
HU Ben. Study on potato dropping damage mechanism and damage-proof device[D]. Chengdu: Xihua University, 2018. (in Chinese)
- [14] 张建华,金黎平,谢开云,等. 马铃薯块茎性状对块茎损伤的影响[J]. 园艺学报,2008,35(10):1455-1460.
ZHANG Jianhua, JIN Liping, XIE Kaiyun, et al. Analysis of potato tuber characters impact on tuber bruises[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2008, 35(10): 1455-1460. (in Chinese)
- [15] 张华,崔永祯,刘小龙,等. 机械收获中马铃薯损伤原因及改进措施[J]. 林业机械与木工设备,2019,47(7):17-22.
ZHANG Hua, CUI Yongzhen, LIU Xiaolong, et al. Analysis of causes of damage to potatoes during mechanical harvest and improvement measures[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2019, 47(7): 17-22. (in Chinese)
- [16] 王冰,胡良龙,胡志超,等. 链杆式升运器薯土分离损伤机理研究[J]. 中国农业大学学报,2014,19(2):174-180.
WANG Bing, HU Lianglong, HU Zhichao, et al. Damage mechanism study of chain-levelex elevator sweet potato harvester[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(2): 174-180. (in Chinese)
- [17] 王兴东,文怀贤,曾镛,等. 马铃薯收获机升运带块茎运动碰撞分析[J]. 农机化研究,2018,40(2):29-33,39.
WANG Xingdong, WEN Huaixian, ZENG Yong, et al. Analysis of movement and impact of tubers on elevator belt of potato harvest[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(2): 29-33, 39. (in Chinese)
- [18] 刘海超. 马铃薯在摆动分离筛上的动力学试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
LIU Haichao. The experimental study on dynamics of potatoes on the separation of potato digger[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [19] 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 4U2A型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):17-24.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 17-24. (in Chinese)
- [20] 郭世鲁,王卫兵,李猛,等. 马铃薯机械碰撞有限元分析与试验研究[J]. 机械设计与制造工程,2016,45(1):56-59.
GUO Shilu, WANG Weibing, LI Meng, et al. Research on the test of potato mechanism and finite element analysis for crash [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(1): 56-59. (in Chinese)
- [21] HUGHES J C, GRANT A, PRESCOTT E H A. A portable pendulum for testing dynamic tissue failure susceptibility of potatoes [J]. Journal of Agricultural Engineering, 1985, 32: 269-277.
- [22] 李智国,刘继展,李萍萍. 机器人采摘中番茄力学特性与机械损伤的关系[J]. 农业工程学报,2010,26(5):112-116.
LI Zhiguo, LIU Jizhan, LI Pingping. Relationship between mechanical property and damage of tomato during robot harvesting [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 112-116. (in Chinese)
- [23] 马晓丽,陈晓英,闫语丝,等. 杨梅果的机械损伤试验和生物力学特性[J]. 农业工程学报,2012,28(16):282-287.
MA Xiaoli, CHEN Xiaoying, YAN Yusi, et al. Mechanical damage test and biomechanical characteristics of redbayberry fruit

- [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 282-287. (in Chinese)
- [24] 鲍玉冬,杨闯,赵彦玲,等. 基于碰撞变形能的机械采收蓝莓果实碰撞损伤评估[J]. 农业工程学报,2017,33(16):283-292.
BAO Yudong, YANG Chuang, ZHAO Yanling, et al. Collision injury assessment of mechanical harvesting blueberry fruit based on collision deformation energy[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 283-292. (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] 石林榕,孙伟,赵武云,等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报,2018,34(6): 35-42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding [J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(6): 35-42. (in Chinese)
- [27] 成大先. 机械设计手册[M]. 5版. 北京:化学工业出版社,2010.
- [28] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [29] 段玥晨,章定国. 基于弹塑性接触的柔性多体系统碰撞动力学[J]. 南京理工大学学报,2012,36(2):189-194.
DUAN Yuechen, ZHANG Dingguo. Flexible multibody system impact dynamics based on elastic-plastic contact [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(2): 189-194. (in Chinese)
- [30] 周杰梁,郑百林. 基于中心差分法的纤维结构碰撞动力学分析[J]. 力学季刊,2011,32(3):466-472.
ZHOU Jieliang, ZHENG Bailin. Impact dynamics analysis of fiber-composed structure based on central difference method [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2011, 32(3): 466-472. (in Chinese)
- [31] 杨文英,刘兰香,刘洋,等. 考虑碰撞弹跳的接触器动力学模型建立及其弹跳特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2019,34(9):1900-1911.
YANG Wenyong, LIU Lanxiang, LIU Yang, et al. Establishing of contactor dynamic model considering collision bounce and analysis of influencing factors of bounce characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1900-1911. (in Chinese)
- [32] 金浩天. 摩擦碰撞若干基本问题的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2014.
JIN Haotian. Study on same basic problems of friction collision [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [33] 李敏,诸德超. 球杆碰撞问题的数值分析和试验研究[J]. 北京航空航天大学学报,2001,27(1):62-65.
LI Min, ZHU Dechao. Analytical and experimental research of ball-bar impact under low velocity [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(1): 62-65. (in Chinese)
- [34] 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)
- [35] 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.
- [36] 葛宜元,梁秋艳,王桂莲. 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,2015.