

马铃薯料斗机除杂装置设计与试验

吕金庆 杜长霖 刘中原 李季成 李紫辉 李忠远

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对马铃薯料斗机除杂装置除杂过程中马铃薯伤薯率高、除杂质量低的问题,通过进行马铃薯除杂过程动力学分析和马铃薯与土壤分离的条件分析,并结合除杂辊转动摩擦除杂的原理,确定了影响马铃薯除杂作业质量的主要因素及各因素的试验取值范围。以马铃薯伤薯率和除杂率为评价指标,以除杂辊间距、装置倾角和除杂辊转速为试验因素,进行了二次旋转正交回归试验,建立了各因素与试验指标间的回归数学模型,分析了各因素对评价指标的影响规律,并进行参数优化。结果表明,当除杂辊间距为 125 mm、装置倾角为 10°、除杂辊转速为 112 r/min 时,马铃薯除杂作业的伤薯率为 0.65%、除杂率为 96.03%,与未经参数优化的料斗机相比,伤薯率减少 0.12 个百分点,除杂率提高 0.63 个百分点,该装置能较好地满足马铃薯仓储作业的要求。

关键词: 马铃薯; 料斗机; 除杂装置; 正交试验; 参数优化

中图分类号: S226.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)01-0082-09

OSID:



Design and Test of Impurity Removal Device of Potato Receiving Hopper

LÜ Jinqing DU Changlin LIU Zhongyuan LI Jicheng LI Zihui LI Zhongyuan

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

Abstract: Aiming at the problems of high potato damage rate and low impurity removal during the impurity removal process of the potato receiving hopper impurity removal device, the kinetic analysis of the potato impurity removal process and the condition analysis of the separation of the potato from the soil are combined with the rotation friction of the impurity removal roller. The principle of impurity, determines the main factors affecting the quality of potato impurity removal and the experimental value range of each factor. Taking potato damage rate and impurity removal rate as the evaluation index, and taking the distance of the impurity removal roller, the inclination angle of the device and the speed of the impurity removal roller as the experimental factors, the second rotation orthogonal regression test was carried out, and the regression mathematical model between each factor and the test index was established. Analyzing the influence of various factors on the evaluation index and optimizing the parameters, the results show that when the distance between the impurity removal roller is 125 mm, the device inclination angle is 10°, and the speed of the impurity removal roller is 112 r/min, the potato damage rate is 0.65%, the impurity removal rate is 96.03%, Compared with the hopper machine without parameter optimization, the potato damage rate is reduced by 0.12 percentage points, and the impurity removal rate is increased by 0.63 percentage points, which can better meet the requirements of potato storage operations.

Key words: potato; receiving hopper; impurity removal device; orthogonal test; parameter optimization

0 引言

刚收获的马铃薯含水率较高,表面粘附的土壤不易脱落,存在收获中未能清除的薯秧等杂质,这将严重影响马铃薯的贮藏质量,造成不必要的损

失^[1-2]。

清选、分级、运输、堆垛及装箱等过程对马铃薯贮藏质量有不同程度的影响,其中清选除杂作业质量对贮藏质量有着直接的影响^[3]。国外马铃薯除杂机械起步早、发展快、技术水平高,大多采用螺旋

辊式除杂装置,加入大量的机、电、液一体化控制,并借助传感技术控制传送量和作业转速,同时更加注重除杂过程中对马铃薯的保护^[4-5]。国内对马铃薯专用除杂机械研究较少。李学强等^[6]设计的马铃薯清选输送机采用松土轮搅动揉搓的方式清选除杂,可达到较好的除杂效果;王相友等^[7]设计了拨辊推送式马铃薯清选机,提高了除杂效率,并通过试验确定了清选装置的结构、作业参数,清选效果较好。

针对国内现有机型结构单一,存在伤薯率较高、除杂质量低的问题,本文设计一种除杂辊间距、转速以及装置倾角可调节的螺旋辊式除杂装置,通过两旋向相反的螺旋除杂辊与马铃薯之间的摩擦,达到除杂目的。对除杂装置进行作业机理分析和除杂过程中马铃薯的运动、受力分析,采用正交试验的方法,分析除杂辊间距、装置倾角、除杂辊转速对伤薯率、除杂率的影响,以研究影响马铃薯除杂作业质量的定性规律,并通过田间试验验证除杂效果。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

马铃薯料斗机除杂装置试验台主要由料斗、液压动力系统、杂质传送带、除杂装置、马铃薯传送带、机架等组成,其整体结构如图1所示。

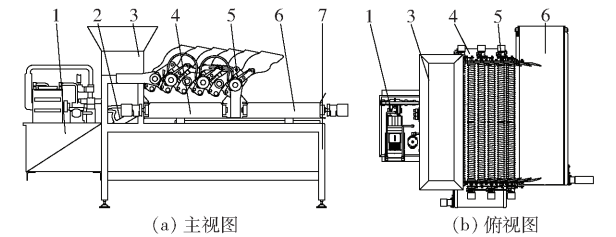


图1 马铃薯料斗机除杂装置试验台整体结构图
Fig.1 Integral structure diagrams of potato receiving hopper machine impurity removal device test bench

1. 液压动力系统 2. 液压缸 3. 料斗 4. 杂质传送带 5. 除杂装置 6. 马铃薯传送带 7. 机架

1.2 工作原理和主要技术参数

马铃薯从料斗滚落到除杂装置上,液压马达驱动除杂辊转动,除杂辊采用交错排列的安装方式,从而避免马铃薯的堆积,通过除杂辊与马铃薯间的摩擦碰撞达到去土的目的;较小的土块以及薯秧从除杂辊间隙掉落,分离的土杂由杂质传送带运送到机外;清洁后的马铃薯滚落到马铃薯传送带,并运输到收集箱或下一级装置;液压缸推动除杂装置在滑轨上平移,完成除杂辊间距、装置倾角的调节。除杂装置倾角、除杂辊间距、除杂辊转速可实现无级调节,以适应不同地况作业需求。除杂装置作业示意图如图2所示。

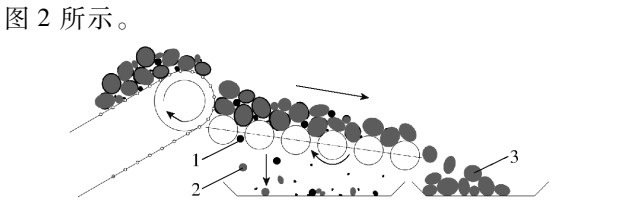


图2 除杂装置作业示意图
Fig.2 Schematic of operation of impurity removal device
1. 泥土杂质 2. 小薯块 3. 大薯块

马铃薯料斗机除杂装置试验台主要用于马铃薯入库或出库时除杂过程中马铃薯除杂率与伤薯率的试验,其主要参数如表1所示。

表1 马铃薯料斗机除杂装置试验台主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters of potato receiving hopper machine impurity removal device test bench

参数	数值
尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 470×2 462×1 498
液压动力系统驱动电机功率(电压)/kW(V)	5.5(380)
液压泵排量/(L·min ⁻¹)	19.2~38.4
液压马达额定压力/MPa	8
液压马达排量/(mL·r ⁻¹)	320
除杂辊转速调整范围/(r·min ⁻¹)	60~120
除杂辊间距调整范围/mm	105~155
除杂装置倾角调整范围/(°)	8~16

2 关键部件设计

除杂装置是料斗机的核心部件^[8],主要由液压马达、侧挡板、除杂辊、外支撑架、花键套、内支撑架、限位板、马达支架、套筒等组成,其结构组成如图3所示。

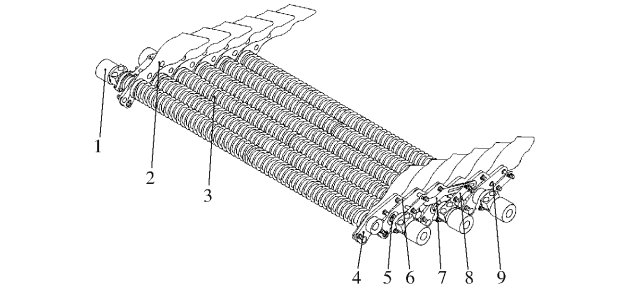


图3 除杂装置结构图
Fig.3 Structure diagram of impurity removal device
1. 液压马达 2. 侧挡板 3. 除杂辊 4. 外支撑架 5. 花键套 6. 内支撑架 7. 限位板 8. 马达支架 9. 套筒

由于输送装置与除杂装置之间存在一定的落差,在除杂作业过程中可能引起马铃薯的跌落损伤,对此,可通过调整除杂装置整体安装高度,尽量减少落差,从而保证马铃薯在滚落过程中不受损伤,参照现有对升运过程损伤机理的分析^[9-10],其安全跌落高度应小于300 mm,本文的装置安装后跌落高度为210 mm,能够使马铃薯不受损伤。

除杂辊交错排列安装在两支撑架间,液压马达固定安装在马达支架上,通过花键套与除杂辊连接,限位板上有滑槽,用以限制除杂装置的两极限位置,避免调节过大或过小。侧挡板安装在外支撑架上并随外支撑架转动,主要起保护马铃薯的作用,避免马铃薯与支撑架碰撞,侧挡板选用塑料材料,以最大限度减少马铃薯损伤。

2.1 除杂辊结构设计

针对现有的除杂辊伤薯率高、易堵塞的问题,设计了一种新型螺旋除杂辊。采用聚氨酯软材料,减少了除杂作业过程中对马铃薯的损伤,除杂辊整体为对称一体式结构,在保证除杂质量的同时增加了装置的承载能力,两侧的螺旋扇叶旋向相反,可以有效避免作业中马铃薯向一边偏移,进而提高除杂质量,螺旋扇叶的螺距过大会减少除杂辊与马铃薯的摩擦面积和摩擦时间,从而降低除杂质量,过小易造成泥土堵塞扇叶沟槽,从而降低除杂质量,收获的马铃薯长轴长度范围在 40 ~ 120 mm,为保证马铃薯不卡在扇叶沟槽内,参考现有机型的弹簧式除杂辊结构和尺寸^[11-12],将本文设计的除杂辊螺距选为 30 mm,扇叶高度 15 mm,除杂辊外轮廓直径为 103 mm,长度为 1.6 m,其结构如图 4 所示。

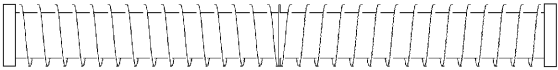


图 4 除杂辊结构图

Fig. 4 Structural diagram of impurity removing roller

2.2 除杂辊组数及排列方式

除杂过程马铃薯每经过一级除杂装置都会受到两除杂辊的摩擦力而产生滚动或滑动,或与除杂辊碰撞产生弹跳,从而达到破土除杂的目的,但过多的摩擦碰撞会对马铃薯造成损伤^[13-14],因此,除杂辊的组数要适中,过少达不到除杂要求,降低除杂率,过多将增加伤薯率。选取 4 ~ 8 组进行单因素试验,试验中控制上料量 20 t/h、除杂辊间距 120 mm、装置倾角 10°、除杂辊转速 100 r/min,以马铃薯除杂率和伤薯率为试验指标,试验结果如表 2 所示,根据试验结果可以看出,随着除杂辊组数增加除杂率增加,伤

表 2 不同除杂辊组数的除杂质量试验结果

Tab. 2 Test results of impurity removal quality with different numbers of impurity removal roller groups

除杂辊组数	除杂率/%	伤薯率/%
4	85.8	0.63
5	91.3	0.68
6	94.7	0.74
7	94.9	0.82
8	95.0	0.93

薯率也增加,当组数达到 6 组及以上时,除杂率增长缓慢,伤薯率增长加快,综合样机实际情况,确定除杂辊组数为 6。

除杂辊采用交错排列的方式,目的是保证马铃薯在作业过程中横向受力平衡,如图 5 所示, F 代表马铃薯所受横向力, n 为除杂辊转速。交错排列避免马铃薯因受单向力导致向一侧偏移,造成堵塞堆积,影响除杂质量,另外交错安装还可以使驱动马达均匀分布在装置的两侧,使支撑架受力平衡,增加除杂装置的稳定性和可靠性。

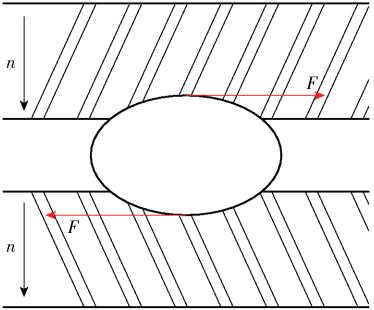


图 5 马铃薯横向受力分析图

Fig. 5 Analysis of potato lateral stress

2.3 支撑架设计

支撑架结构图如图 6 所示。为增强支撑架的稳定性,将每个支撑架的连接点由传统的 3 点增加到 4 点^[15],支撑架采用平行四杆机构原理,为了使安装调节更加便捷,将支撑架连接点设为等距,使相邻支撑架间构成菱形,从而保证有足够支撑强度的同时实现间距的无级调节,支撑架由内外 3 层构成,外侧的 2 层为同一种支撑架,根据连接点个数不同,内层支撑架又分为 5 种,4 连接点 1 种,3 连接点 2 种,2 连接点 2 种。支撑架的运动机构简图如图 7 所示,其中滑块

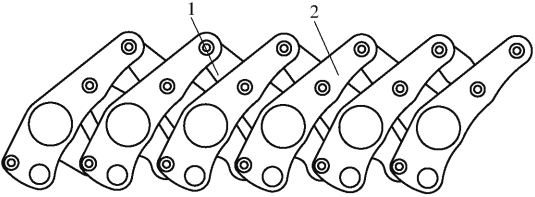


图 6 支撑架结构图

Fig. 6 Support frame structure

1. 内支撑架 2. 外支撑架

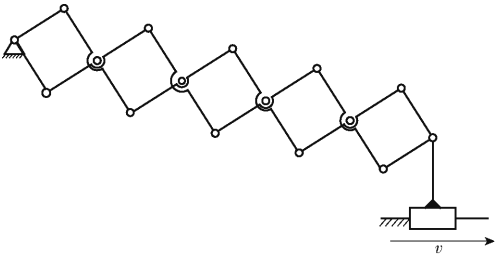


图 7 支撑架运动机构简图

Fig. 7 Sketch of support frame movement

为主动件, 滑块移动带动支撑架伸缩, 对该机构进行结构分析^[16-17], 其中构件数 $i = 13$, 低副自由度 $P_L = 19$, 高副自由度 $P_H = 0$, 由机构自由度计算公式求得该机构的自由度为

$$H = 3i - 2P_L - P_H = 3 \times 13 - 2 \times 19 - 0 = 1 \quad (1)$$

由此可知机构的自由度等于主动件个数, 该机构具有确定的运动, 即当给定滑块的位移, 支撑架有唯一对应的位置关系, 从而确定了除杂辊的位置以及间距, 也验证了通过控制滑块移动实现除杂辊间距调节是可行的。

3 马铃薯与除杂辊动力学分析

3.1 动力学分析

马铃薯从料斗滚落到除杂装置上, 完成除杂作业, 其在除杂辊上的受力情况如图 8 所示, 假设马铃薯长短半轴长度分别为 a 、 b , 除杂辊直径为 d , 除杂辊间距为 l , 装置倾角为 θ , 除杂辊的转速为 n , 马铃薯的转速为 n_1 , 马铃薯中点为 O 点, 两相切点分别为 O_1 、 O_2 。

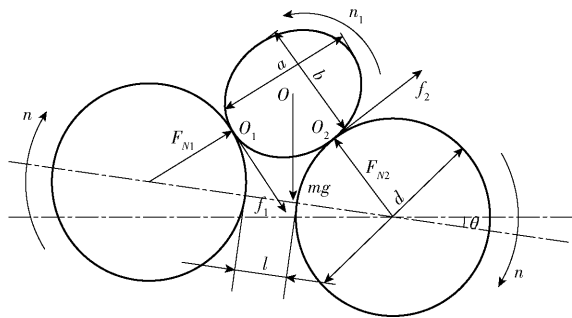


图 8 马铃薯纵向受力分析图

Fig. 8 Analysis of potato longitudinal force

分析可知马铃薯在除杂辊上受到 5 个力, 分别为马铃薯自身重力 mg , 两除杂辊的支持力 F_{N1} 、 F_{N2} , 以及两个摩擦力 f_1 、 f_2 。为保证作业的连续性, 就要使马铃薯能翻越下一级除杂辊, 即各力对 O_2 点的合力矩大于零^[18-19]。

由于在运动过程中马铃薯的位置不断变化, 不便于力的分析, 因此采用坐标变换的方式, 将马铃薯所在的动坐标系经过一次旋转变换、一次平移变换, 转换到除杂辊所在的静坐标系, 再加以分析, 其变换示意图如图 9 所示。马铃薯长轴与水平线夹角为 α , β 为支持力与除杂辊连心线的夹角, 以马铃薯的长短半轴为坐标轴, 构成 x_1y_1 动坐标系; 以马铃薯中心为原点, 以水平和竖直线为 x 、 y 坐标轴构成 $x'_1y'_1$ 坐标系, 以除杂辊圆心为原点, 水平和竖直线为 x 、 y 坐标轴构成 xy 静坐标系, 则在 x_1y_1 坐标系中马铃薯椭圆方程为

$$\frac{x_1^2}{a^2} + \frac{y_1^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

在 xy 坐标系中左侧除杂辊方程 $f_1(x, y)$ 为

$$(x + l\cos\theta)^2 + (y - l\sin\theta)^2 = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (3)$$

右侧除杂辊方程 $f_2(x, y)$ 为

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (4)$$

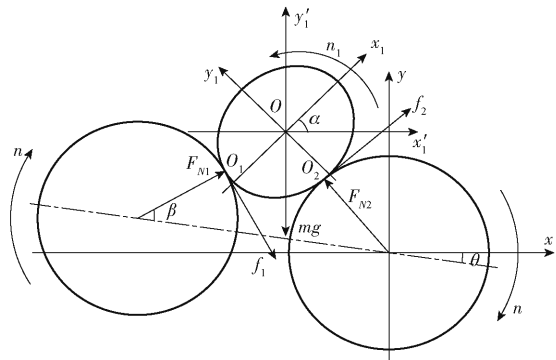


图 9 马铃薯坐标变换示意图

Fig. 9 Schematic of potato coordinate transformation

在 x_1y_1 坐标系中马铃薯所在的椭圆方程如式(2)所示, 根据坐标系旋转变换公式

$$\begin{cases} x_1 = x'_1 \cos\alpha + y'_1 \sin\alpha \\ y_1 = y'_1 \cos\alpha - x'_1 \sin\alpha \end{cases} \quad (5)$$

得到在 $x'_1y'_1$ 坐标系中椭圆方程变换式为

$$\frac{(x'_1 \cos\alpha + y'_1 \sin\alpha)^2}{a^2} + \frac{(y'_1 \cos\alpha - x'_1 \sin\alpha)^2}{b^2} = 1 \quad (6)$$

假设 O 点在 xy 坐标系中坐标为 (x_o, y_o) , 又有坐标系横移变换公式为

$$\begin{cases} x = x'_1 + x_o \\ y = y'_1 - y_o \end{cases} \quad (7)$$

设椭圆在 xy 坐标系中表达式为 $F(x, y)$, 原椭圆方程变换式为

$$\begin{aligned} & \frac{[(x - x_o) \cos\alpha + (y + y_o) \sin\alpha]^2}{a^2} + \\ & \frac{[(y + y_o) \cos\alpha - (x - x_o) \sin\alpha]^2}{b^2} = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

由于在 xy 坐标系中椭圆与两圆相外切, 即 $\begin{cases} F(x, y) \\ f_1(x, y) \end{cases}$ 有唯一公共解, $\Delta = 0$; $\begin{cases} F(x, y) \\ f_2(x, y) \end{cases}$ 有唯一公共解, $\Delta = 0$ 。

联立方程组, 得到 O 点在 xy 坐标系中的相对坐标为

$$\begin{cases} x_o = -\frac{2l\cos\theta}{a+b+d} \cos(\alpha + \theta) \\ y_o = \frac{a+b+d}{2} \sin(\alpha - \theta) \end{cases} \quad (9)$$

O_2 点在 xy 坐标系中的相对坐标为

$$\begin{cases} x_{o_2} = -\frac{4dl\cos\theta\cos(\alpha+\theta)}{2\sqrt{(4l\cos\theta\cos(\alpha+\theta))^2+(a+b+d)^4}\sin(\alpha-\theta)} \\ y_{o_2} = \frac{a+b+d}{2}\sin(\alpha-\theta) \end{cases} \quad (10)$$

根据点到直线的距离公式依次求得 O_2 点到力 F_{N1} 的距离

$$s = \frac{k_1 x_{o_2} - y_{o_2} + k_1 l \cos\theta + l \sin\theta}{\sqrt{k_1^2 + 1}} \quad (11)$$

O_2 点到 mg 的距离为

$$h = \frac{k_2 x_{o_2} - y_{o_2} - \frac{(a+b+d)^2 \sin(\alpha-\theta)}{4l\cos\theta\cos(\alpha+\theta)}}{\sqrt{k_2^2 + 1}} \quad (12)$$

O_2 点到 f_1 的距离为

$$t = x_{o_2} - x_o \quad (13)$$

式中 k_1 ——支持力 F_{N1} 所在直线的斜率

k_2 ——支持力 F_{N2} 所在直线的斜率

由此得到合力矩为

$$\sum M_{O_2} = F_{N1}s - f_1h - mgt \quad (14)$$

将式(11)~(13)代入式(14)化简得

$$\sum M_{O_2} = F_{N1}(a+b+d)^2 \sin(\alpha-\theta) - mgas\sin\theta - f_1l + acos(\alpha+\theta) > 0 \quad (15)$$

马铃薯在除杂过程中主要受到支持力和摩擦力的作用,支持力的大小受重力和装置倾角的影响,摩擦力的大小受支持力和摩擦因数影响,根据式(14)、(15)可知,当马铃薯的尺寸以及在除杂辊上的位置一定时,其所受的合力矩主要受力臂 s 、 h 、 t 以及装置倾角 θ 影响,又因为力臂的大小与除杂辊直径 d 、除杂辊间距 l 、装置倾角 θ 有直接关系,因此除杂辊直径 d 、除杂辊间距 l 、装置倾角 θ 是影响马铃薯翻越的主要因素,另外马铃薯在翻滚过程中还会受到相邻马铃薯的碰撞,运动过程比较复杂,除杂辊转速 n 也是影响除杂质量的重要因素^[20-21]。

除杂辊直径 d 过大会导致两除杂辊间沟槽过深,马铃薯难以翻越,造成堆积,影响作业质量,过小会导致马铃薯在装置上停留时间过短,降低除杂率,且除杂辊直径不便于实现在试验中的调节,现有除杂辊的直径一般为 90~120 mm,综合考虑辊轴直径以及扇叶高度,将本文的除杂辊直径 d 设计为 103 mm,并将此结果应用到正交试验。

3.2 马铃薯与土壤分离条件分析

刚收获的马铃薯由于土壤含水率较高,极易黏结在马铃薯表面,可通过对土壤与马铃薯的黏结力进行分析,得到分离的条件,实现黏结土壤的破除。

将土块与马铃薯接触部分等效成两半圆,对其进行受力分析,其受力情况如图 10 所示, F_1 、 F_2 为薯块与土块的相互作用力, F_3 、 F_4 为薯块与土块间的黏结力, G_1 、 G_2 为土块与薯块的重力, F_5 为薯块受到的整薯的合外力。

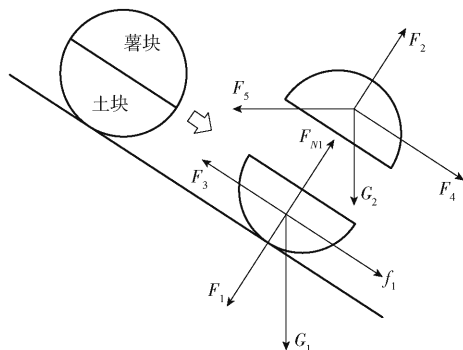


图 10 土块分离过程分析

Fig. 10 Analysis of soil block separation process

为使土块能被正常分离,要保证破坏力大于其黏结力,即

$$f_1 + G_1 \sin\theta > F_3 \quad (16)$$

土壤破碎的难易程度与土壤强度成正比,黏结力是产生土壤强度的主要原因,土壤的黏结力计算公式为

$$F_3 = cS \quad (17)$$

式中 c ——土壤黏结强度, kPa

S ——土壤断裂面面积, cm^2

黏结力还与土壤含水率有关,收获时马铃薯土壤的含水率范围在 20%~25%,根据式(17)计算得平均抗剪切阻力为 1 N/cm^2 。重力 G_1 在单位面积上的作用力为 0.05 N/cm^2 ,因此 $G_1 \sin\theta$ 在数值上很小,可以忽略不计,当满足单位面积上 $f_1 > 1 \text{ N}$ 时,马铃薯表面的泥土能够被清除。根据摩擦特性有

$$f_1 = \mu F_{N1} \quad (18)$$

式中 μ ——除杂辊与土壤的摩擦因数,取 0.83

根据图 9 计算化简得

$$F_{N1} = \frac{mg}{(\mu+1)\sin(\beta-\theta) + (1-\mu)\cos(\beta-\theta)} \quad (19)$$

其中

$$\beta = \arccos \frac{l}{a+b+d} \quad (20)$$

由式(18)~(20)可知,马铃薯所受摩擦力的大小与装置的倾角 θ 以及除杂辊间距 l 有关,且与马铃薯重量 mg 成正比,与 $\beta-\theta$ 成反比,以最小薯块 100 g 计算,当除杂辊间距 l 取最小值 105 mm、装置倾角 θ 取最小值 0 时,摩擦力 f_1 最小为 1.12 N,大于 1 N,能够保证马铃薯与土壤分离,完成除杂作业。因此,装置倾角 θ 和除杂辊间距 l 是影响马铃薯与土壤分离的主要因素。马铃薯与土壤分离还受作业

次数的影响,除杂辊间距 l 是作业次数的主要影响因素,在一定范围内,除杂辊间距 l 与作业次数成正比关系。

综合考虑得以除杂辊间距 l 、装置倾角 θ 、除杂辊转速 n 作为试验因素进行正交试验分析,并根据试验得到除杂效果的最优解。

4 台架试验

4.1 试验材料与装置

试验于 2019 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。选择收获当天的尤金 885 为试验对象,试验所用马铃薯均无内部损伤和外部可见损伤,单颗马铃薯直径范围在 30 ~ 65 mm,长轴长度范围在 40 ~ 120 mm,马铃薯为椭圆形,平均长度、宽度、厚度为 83.47、62.65、55.25 mm,平均形状指数为 0.797,马铃薯质量范围为 100 ~ 400 g,平均含水率 73.2%^[22],试验物料中含有薯秧、泥土等杂质,其中泥土的湿度为 20%。马铃薯料斗机除杂装置试验台试验过程如图 11 所示。

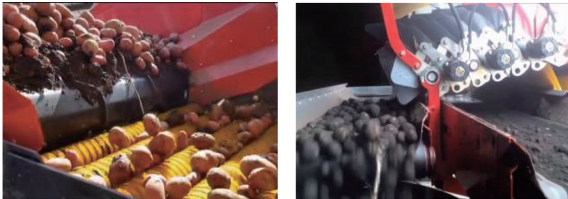


图 11 试验过程

Fig.11 Test process

4.2 评价指标与试验因素

根据实际作业情况,并参考 DB15/T 1418—2018《马铃薯种薯智能仓储技术规程》,将马铃薯伤薯率 η 和除杂率 ε 作为本试验研究的评价指标,其计算公式为

$$\eta = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \tag{21}$$

$$\varepsilon = \frac{m_2}{m_2 + M} \times 100\% \tag{22}$$

式中 m_1 ——作业后损伤的马铃薯质量
 m_2 ——作业后马铃薯总质量
 M ——杂质总质量

根据马铃薯在除杂作业过程中的动力学分析以及实际作业情况,结合现有的对除杂作业影响因素的研究,确定除杂辊间距 l 、装置倾角 θ 、除杂辊转速 n 为主要试验因素。试验过程中以恒定 20 t/h 的上料速度上料,两输送带的运输速度恒定为 0.6 m/s。

4.3 试验方案与结果分析

4.3.1 试验方案与结果

采用二次旋转正交组合试验设计方法进行试

验安排,查阅相关机型的作业参数,并综合样机的工作实际情况,确定除杂辊间距范围为 105 ~ 155 mm、装置倾角范围为 8° ~ 16°、除杂辊转速范围为 60 ~ 120 r/min^[23],以伤薯率和除杂率为试验指标进行试验。试验过程中,应严格控制上料速度和上料量,避免因上料过多造成马铃薯堆积,从而影响试验结果的显著性;可通过调节液压缸伸缩长度来调节除杂辊间距以及除杂装置倾角;可通过调节液压马达的转速来调节除杂辊转速。试验结束后,在测量统计过程中应轻拿轻放,避免测量过程中对马铃薯造成二次损伤,影响试验结果的准确性。通过试验结果对影响试验指标的因素进行显著性分析,根据实际需求及上述确定的参数范围,对各参数组合进行优化求解,最终获得较合适的各因素组合。试验因素编码如表 3 所示,试验方案与结果如表 4 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Experimental factors and codes

编码	试验因素		
	除杂辊间距	装置倾角	除杂辊转速
	x_1/mm	$x_2/(\text{^\circ})$	$x_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1.682	155.0	16.00	120.00
1	144.9	14.38	107.84
0	130.0	12.00	90.00
-1	115.1	9.62	72.16
-1.682	105.0	8.00	60.00

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Test plan and experimental data

序号	试验因素			伤薯率	除杂率
	x_1/mm	$x_2/(\text{^\circ})$	$x_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$\eta/\%$	$\varepsilon/\%$
1	115.1	9.62	72.16	0.55	94.40
2	144.9	9.62	72.16	0.63	95.95
3	115.1	14.38	72.16	0.53	93.85
4	144.9	14.38	72.16	0.96	94.90
5	115.1	9.62	107.84	0.93	95.00
6	144.9	9.62	107.84	1.08	96.30
7	115.1	14.38	107.84	0.96	94.70
8	144.9	14.38	107.84	1.16	97.20
9	105.0	12.00	90.00	0.58	94.00
10	155.0	12.00	90.00	0.86	96.54
11	130.0	8.00	90.00	0.70	96.10
12	130.0	16.00	90.00	0.95	95.20
13	130.0	12.00	60.00	0.56	94.50
14	130.0	12.00	120.00	1.20	95.70
15	130.0	12.00	90.00	0.99	96.30
16	130.0	12.00	90.00	1.02	96.40
17	130.0	12.00	90.00	1.10	96.70
18	130.0	12.00	90.00	0.98	95.80
19	130.0	12.00	90.00	0.97	96.20
20	130.0	12.00	90.00	0.90	95.90
21	130.0	12.00	90.00	1.01	96.30
22	130.0	12.00	90.00	0.94	96.05
23	130.0	12.00	90.00	1.06	96.50

4.3.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析,并对各试验指标进行多元回归拟合^[24-25],得到马铃薯伤薯率 η 和除杂率 ε 的回归方程,最后检验各试验因素的显著性。

(1) 马铃薯伤薯率 η

通过对试验数据的分析和拟合,马铃薯伤薯率 η 方差分析如表 5 所示。由表 5 可知,对于试验指标伤薯率 η ,各因素和因素间的交互作用影响主次顺序是 x_3 、 x_1 、 x_1^2 、 x_2 、 x_2^2 、 x_1x_2 、 x_3^2 、 x_2x_3 、 x_1x_3 ;其中 x_3 、 x_1 、 x_1^2 、 x_2 、 x_2^2 对试验指标伤薯率 η 的影响极显著 ($P<0.01$); x_1x_2 对伤薯率 η 的影响显著 ($0.01<P<0.05$); x_3^2 对伤薯率 η 的影响较显著 ($0.05<P<0.1$); x_2x_3 、 x_1x_3 对伤薯率 η 的影响不显著 ($P>0.1$)。将不显著交互作用项的回归平方及自由度

并入残差项,得到的方差分析结果如表 5 所示。由软件得到各因素对伤薯率 η 影响的回归方程为

$$Y_1 = -7.571\,37 + 0.091\,726x_1 + 0.052\,821x_2 + 0.027\,517x_3 + 0.001\,414\,21x_1x_2 - 0.000\,392\,847x_1^2 - 0.008\,783\,1x_2^2 - 0.000\,095\,032\,8x_3^2$$

(23)

对得到的回归方程式 (23) 进行失拟检验,结果如表 5 所示,失拟项 $P=0.370\,2$,不显著 ($P>0.1$),证明方程模拟较好,不存在其他影响试验指标的主要因素。通过失拟检验表明试验因素和试验指标存在显著的二次关系,上述分析结果较合理。

(2) 马铃薯除杂率 ε

通过对试验数据的分析和拟合,马铃薯除杂率 ε 方差分析如表 6 所示。由表 6 可知,对于试验指标除杂率 ε ,因素影响的主次顺序是 x_1 、 x_3 、 x_3^2 、

表 5 马铃薯伤薯率 η 方差分析
Tab.5 Variance analysis of potato injury rate

变异来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	0.85/0.84	9/7	0.095/0.12	23.24/29.56	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_1	0.13/0.13	1/1	0.13/0.13	31.82/31.80	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_2	0.052/0.052	1/1	0.052/0.052	12.69/12.68	0.003 5 *** /0.002 8 ***
x_3	0.47/0.47	1/1	0.47/0.47	115.57/115.48	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_1x_2	0.02/0.02	1/1	0.02/0.02	4.91/4.90	0.045 2 ** /0.042 7 **
x_1x_3	0.003 2	1	0.003 2	0.79	0.391 7
x_2x_3	0.005	1	0.005	1.23	0.288 1
x_1^2	0.12/0.12	1/1	0.12/0.12	29.38/29.35	0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_2^2	0.039/0.039	1/1	0.039/0.039	9.62/9.62	0.008 4 *** /0.007 3 ***
x_3^2	0.015/0.015	1/1	0.015/0.015	3.56/3.56	0.081 5 * /0.078 6 *
残差	0.053/0.061	13/15	0.004 1/0.004 1		
失拟差	0.024/0.032	5/7	0.004 8/0.004 6	1.32/1.27	0.344 4/0.370 2
总和	0.91/0.91	22/22			

注:“/”后数字为剔除不显著因素后伤薯率方差分析结果;*** 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 6 马铃薯除杂率 ε 方差分析
Tab.6 Variance analysis of potato impurity removal rate

变异来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	17.44/17.2	9/7	1.94/2.46	21.45/26.03	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_1	8.34/8.34	1/1	8.34/8.34	92.30/88.35	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_2	0.46/0.46	1/1	0.46/0.46	5.12/4.90	0.041 4 ** /0.042 7 **
x_3	2.74/2.74	1/1	2.74/2.74	30.34/29.04	0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_1x_2	0.061	1	0.061	0.68	0.425 2
x_1x_3	0.18	1	0.18	1.99	0.181 6
x_2x_3	0.61/0.61	1/1	0.61/0.61	6.70/6.41	0.022 5 ** /0.023 0 **
x_1^2	1.86/1.86	1/1	1.86/1.86	20.59/19.71	0.000 6 *** /0.000 5 ***
x_2^2	0.69/0.69	1/1	0.69/0.69	7.59/7.27	0.016 4 ** /0.016 6 **
x_3^2	2.57/2.57	1/1	2.57/2.57	28.45/27.24	0.000 1 *** /0.000 1 ***
残差	1.17/1.42	13/15	0.09/0.094		
失拟差	0.52/0.76	5/7	0.10/0.11	1.25/1.31	0.369 4/0.353 2
总和	18.62/18.62	22/22			

$x_1^2, x_2^2, x_2x_3, x_2, x_1x_3, x_1x_2$, 其中 x_1, x_3, x_3^2, x_1^2 对除杂率 ε 的影响极显著 ($P < 0.01$); x_2^2, x_2x_3, x_2 对除杂率 ε 的影响较显著 ($0.01 < P < 0.05$); x_1x_3, x_1x_2 对除杂率 ε 的影响不显著 ($P > 0.1$)。将不显著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 6 所示。得到各因素对除杂率 ε 影响的回归方程

$$Y_2 = 53.378\,55 + 0.455\,13x_1 + 0.220\,80x_2 + 0.174\,87x_3 + 0.006\,481\,81x_2x_3 - 0.001\,548\,32x_1^2 - 0.036\,731x_2^2 - 0.001\,264\,11x_3^2 \quad (24)$$

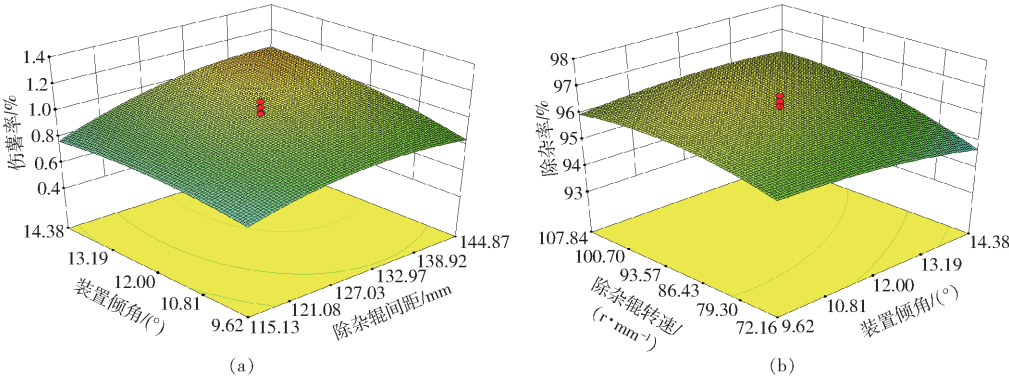


图 12 除杂率和伤薯率的双因素影响响应曲面
Fig. 12 Response surface of two factors affecting impurity removal rate and potato damage rate

如图 12a 所示, 当除杂辊间距一定时, 马铃薯伤薯率随着装置倾角的增加呈逐渐增大的趋势, 且除杂辊的间距越大, 伤薯率增加的越显著, 最优的装置倾角范围为 $8.9^{\circ} \sim 11.4^{\circ}$; 当装置倾角一定时, 马铃薯伤薯率与除杂辊间距成正比, 最优的除杂辊间距范围为 $118.3 \sim 126.5\text{ mm}$, 其中, 除杂辊间距是影响马铃薯伤薯率的主要试验因素。

如图 12b 所示, 当除杂辊转速一定时, 马铃薯除杂率整体上随着装置倾角的增加呈减小趋势, 最优的装置倾角范围为 $9.2^{\circ} \sim 11.7^{\circ}$; 当装置倾角一定时, 马铃薯除杂率整体上与除杂辊转速成正比, 最佳的除杂辊转速范围为 $98 \sim 116\text{ r/min}$, 其中, 除杂辊转速是影响马铃薯除杂率的主要试验因素。

4.3.4 参数优化

通过对试验结果以及图 12 中 2 个响应曲面的分析, 得到最佳的试验因素水平组合, 并利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对 3 个回归模型进行求解, 根据马铃薯料斗机除杂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

$$\begin{cases} \min Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \max Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 118.3\text{ mm} \leq x_1 \leq 126.5\text{ mm} \\ 9.2^{\circ} \leq x_2 \leq 11.4^{\circ} \\ 98\text{ r/min} \leq x_3 \leq 116\text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

对上述回归方程进行失拟检验, 如表 6 所示, 其中 $P = 0.353\,2$, 不显著 ($P > 0.1$), 证明方程模拟较好, 不存在其他影响指标的主要因素, 试验因素和试验指标存在显著的二次关系, 上述分析结果合理。

4.3.3 响应曲面分析

运用软件 Design-Expert 8.0.6 对试验数据进行处理, 得出除杂辊间距 x_1 、装置倾角 x_2 、除杂辊转速 x_3 之间的显著和较显著交互作用对伤薯率 η 和除杂率 ε 两个试验指标影响的响应曲面, 如图 12 所示。

通过优化求解, 得到除杂辊间距为 $118.3 \sim 126.5\text{ mm}$, 装置倾角为 $9.2^{\circ} \sim 11.4^{\circ}$, 除杂辊转速为 $98 \sim 116\text{ r/min}$ 时, 除杂作业过程中马铃薯的损伤最小, 除杂效果最佳, 其伤薯率为 $0.63\% \sim 0.81\%$, 除杂率为 $95.6\% \sim 96.5\%$ 。

4.4 田间验证试验

田间验证试验的测试方法和测试环境与正交试验相同, 通过比较经过参数优化调节后的马铃薯伤薯率和除杂率与未经参数优化调节的马铃薯伤薯率和除杂率之间的差异, 进而验证参数优化后除杂装置的除杂作业效果。

分别以传统马铃薯料斗机除杂装置的作业参数: 除杂辊间距 127 mm 、装置倾角 12° 、除杂辊转速 145 r/min , 优化后马铃薯料斗机除杂装置的作业参数: 除杂辊间距 125 mm 、装置倾角 10° 、除杂辊转速 112 r/min 进行试验, 分别进行 3 次试验, 结果取平均值, 试验结果如表 7 所示。

由表 7 可知, 优化后的马铃薯料斗机除杂装置作业参数下的除杂作业质量明显高于传统马铃薯料斗机除杂装置作业参数下的除杂作业质量。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料斗机除杂装置可有效降低马铃薯伤薯率, 提高除杂率。

表7 装置除杂效果对比
Tab.7 Comparison of device removal effect %

机型	伤薯率 η		除杂率 ε	
	试验结果	平均值	试验结果	平均值
传统除杂装置	0.77		95.1	
	0.76	0.77	95.6	95.4
	0.78		95.5	
优化后除杂装置	0.64		96.1	
	0.66	0.65	95.9	96.03
	0.65		96.1	

5 结论

(1)通过对马铃薯除杂过程的动力学分析和马铃薯与土壤分离的条件分析,建立了除杂作业过程中伤薯率、除杂率的数学模型,得到影响除杂

作业质量的主要因素为除杂辊间距、装置倾角、除杂辊转速。设计了马铃薯料斗机除杂装置试验台,并进行了二次正交旋转组合试验,对料斗机除杂装置的工作参数进行了优化,有效提高了除杂作业质量。

(2)进行了马铃薯料斗机除杂装置作业质量台架试验,建立了各试验指标与影响因素间的回归模型,并对回归模型进行了优化求解,试验表明:当除杂辊间距为125 mm、装置倾角为10°、除杂辊转速为112 r/min时,马铃薯除杂作业的伤薯率为0.65%、除杂率为96.03%,比未经参数优化的料斗机伤薯率减少0.12个百分点,除杂率提高0.63个百分点,能够较好地满足马铃薯仓储作业的要求。

参 考 文 献

[1] 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/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):1-16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190301&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.001. (in Chinese)

[2] 赵赛楠,马艺超,高若婉,等. 国内外马铃薯贮藏保鲜技术研究现状[J]. 保鲜与加工,2019,19(1):153-158.
ZHAO Sainan, MA Yichao, GAO Ruowan, et al. Research status of potato storage technology at home and abroad[J]. Storage and Process,2019,19(1):153-158. (in Chinese)

[3] 杨红光,谢焕雄,颜建春,等. 马铃薯采后机械化清洗技术综述[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):115-120.
YANG Hongguang, XIE Huanxiong, YAN Jianchun, et al. Overview of mechanized cleaning technology of post harvest potato[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(3):115-120. (in Chinese)

[4] EL-GENDY S L A, MORAD M M, EL-SHAL H M. Comparative study between some different potato harvesting machines in small holdings[J]. Zagazig Journal of Agricultural Research,2015,12(4):148-153.

[5] MOSALANEJAD H, MOBILI H, POURSOURSOLTAN A. The main parameters assessment of clod and stone separation from potato crop (inclined belt type) in potato harvester[J]. Majlesi Journal of Mechanical Engineering,2011(2):79-84.

[6] 李学强,卢延芳,苏国梁,等. 多功能马铃薯清洗输送机的设计[J]. 湖北农业科学,2016,55(7):1832-1835.
LI Xueqiang, LU Yanfang, SU Guoliang, et al. Design on multi-functional potato cleaning conveyor[J]. Hubei Agricultural Sciences,2016,55(7):1832-1835. (in Chinese)

[7] 王相友,孙景彬,许英超,等. 拨辊推送式马铃薯清选分选机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):316-322,279.
WANG Xiangyou, SUN Jingbin, XU Yingchao, et al. Design and experiment of potato cleaning and sorting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(10):316-322,279. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171040&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.040. (in Chinese)

[8] 姜彦武,魏宏安,陆翔辉,等. 马铃薯分选机的设计[J]. 甘肃农业大学学报,2017,52(1):139-143.
JIANG Yanwu, WEI Hongan, LU Xianghui, et al. Design of potato tuber sorter[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017,52(1):139-143. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 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)

[11] 申屠留芳,韦奇,巩尊国,等. 马铃薯分选机的设计[J]. 农机化研究,2014,36(8):114-117.
SHENTU Liufang, WEI Qi, GONG Zunguo, et al. Design of potato sorter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(8):114-117. (in Chinese)

[12] ZHOU K, JENSEN A L, BOCHTIS D D. Simulation model for the sequential in-field machinery operations in a potato production system[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2015,116(8):173-186.

[13] 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)

[14] 吕金庆,杨晓涵,吕伊宁,等. 马铃薯挖掘机升运分离过程块茎损伤机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(1):103-113.
LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, LÜ Yining, et al. Analysis and experiment of potato damage in process of lifting and separating potato excavator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):103-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.011. (in Chinese)

- [30] THOMSON W T. Mechanical vibrations [M]. New York: Prentice-Hall, 1953.
- [31] GB/T 20183.3—2006 植物保护机械 喷雾设备 第 3 部分: 农业液力喷雾机每公顷施液量调节系统试验方法 [S]. 2006.
- [32] 胡桂琴, 许林云, 周宏平, 等. 影响空心圆锥雾喷头雾滴粒径的多因素分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2014, 38(2): 133—136.
HU Guiqin, XU Linyun, ZHOU Hongping, et al. Analysis of multi-factor influence on droplet size distribution of hollow cone nozzle [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(2): 133—136. (in Chinese)
- [33] 金春玉. 空心圆锥雾化喷嘴喷雾实验与数值研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
JIN Chunyu. Experimental and numerical investigation on sprays of hollow-cone press ure nozzle [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
- [34] 杜岳峰, 毛恩荣, 宋正河, 等. 基于 ADAMS 的玉米植株收获过程仿真 [J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 106—111.
DU Yuefeng, MAO Enrong, SONG Zhenghe, et al. Simulation on corn plants in harvesting process based on ADAMS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (Supp.): 106—111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2012s021&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.021. (in Chinese)
- [35] 杜岳峰, 朱忠祥, 宋正河, 等. 小型玉米收获机分禾与摘穗装置性能仿真 [J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 100—105.
DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, et al. Simulation of divider and snapping roll for small-scale corn harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (Supp.): 100—105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s20&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.020. (in Chinese)
- [36] 郭金伟, 许允斗, 张国兴, 等. 四面体式折展机械臂设计与分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 384—389.
GUO Jinwei, XU Yundou, ZHANG Guoxing, et al. Design and analysis of tetrahedral deployable mechanical arm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 384—389. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200944&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.044. (in Chinese)
- [37] 刘可, 李可, 宿磊, 等. 基于蚁群算法与参数迁移的机器人三维路径规划方法 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 29—36.
LIU Ke, LI Ke, SU Lei, et al. Robot 3D path planning method based on ant colony algorithm and parameter transfer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 29—36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200103&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.003. (in Chinese)
- [38] 韩兴国, 宋小辉, 殷鸣, 等. 熔融沉积式 3D 打印路径优化算法研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 393—401, 410.
HAN Xingguo, SONG Xiaohui, YIN Ming, et al. Path optimization algorithm of 3D printing based on fused deposition modeling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 393—401, 410. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180350&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.050. (in Chinese)
- [39] 曹如月, 李世超, 季宇寒, 等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 34—39.
CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (Supp.): 34—39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s006&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.006. (in Chinese)
- [40] GBT17997—2008 农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定 [S]. 2008.

(上接第 90 页)

- [15] BENTINI M, CAPRARA C, MARTELLI R. Harvesting damage to potato tubers by analysis of impacts recorded with an instrumented sphere [J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(1): 75—85.
- [16] 成大先. 机械设计手册 [M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [17] 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.
- [18] 孙军, 于文强, 李学强, 等. 马铃薯分选输送线静力学分析与计算方法 [J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 89—92.
- [19] 杨然兵, 杨红光, 尚书旗, 等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 119—126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119—126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160717&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017. (in Chinese)
- [20] 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 Chuazhu, 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)
- [21] 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)
- [22] 田悦, 赵萍, 李永奎, 等. 东北五种早熟马铃薯的物理参数测试与分析 [J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(6): 737—744.
TIAN Yue, ZHAO Ping, LI Yongkui, et al. Measurement and analysis of physical parameters of five early maturing potato varieties in Northeast China [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(6): 737—744. (in Chinese)
- [23] 纪晓磊, 于文强, 吴峰倩. 马铃薯清选机关键工作参数的优化分析 [J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 23—27, 32.
JI Xiaolei, YU Wenqiang, WU Fengqian. Optimization analysis of the key working parameters of potato cleaning machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 23—27, 32. (in Chinese)
- [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.
- [25] 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.