

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.005

# 舀勺式马铃薯播种机排种器清种装置设计与试验

吕金庆<sup>1,2</sup> 王鹏榕<sup>1</sup> 杨晓涵<sup>1</sup> 李紫辉<sup>1</sup> 李季成<sup>1</sup> 衣淑娟<sup>2</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

**摘要:** 针对目前舀勺式马铃薯播种机排种器清种装置振动频率不均、振幅调整不匀, 以及清种部件结构不合理, 导致种薯重播率高、漏播率高和损伤率高等问题, 设计了舀勺式马铃薯播种机排种器的清种装置。通过对清种作业过程进行运动学和动力学分析, 确定了影响清种效果的主要因素, 设计了清种装置的关键部件。以偏心距、输送带主驱动轮转速、种层高度为试验因素, 以重播率、漏播率为试验指标进行田间试验, 试验结果表明: 弹性引导式清种部件可有效清除勺间夹带种薯, 振动清种装置可有效清除勺内多余种薯, 显著提升了排种器的工作效率。当偏心距为 1.9 mm、输送带主驱动轮转速为 40.61 r/min、种层高度为 33 cm 时, 重播率为 3.04%, 漏播率为 2.01%, 指标优于国家行业标准, 清种效果提升显著。

**关键词:** 马铃薯; 舀勺式排种器; 清种装置

**中图分类号:** S223.93      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0051-10

## Design and Experiment of Seed-clearing Device for Cup-belt Type Potato Seed-metering Device

LÜ Jinqing<sup>1,2</sup> WANG Pengrong<sup>1</sup> YANG Xiaohan<sup>1</sup> LI Zihui<sup>1</sup> LI Jicheng<sup>1</sup> YI Shujuan<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that uneven vibration frequency, uneven amplitude adjustment and unreasonable structure of the seed dressing device, the seedlings had high weight loss rate and high damage rate. Breeding device for potato seeder seed metering device was designed. Through the kinematics and dynamics analysis of the cleaning operation process, the main factors affecting the seed cleaning effect were determined, and the structure of the seed cleaning device was designed. This plank can also reduce the horizontal velocity of potato seed to decrease the distance of potato drop into furrow. The eccentricity, the main driving wheel speed of the conveyor belt and the height of the seed layer were used as experimental factors. The field experiment was carried out with the re-broadcast rate and the missed-air rate as test indicators. The test results showed that the elastic-guided clean-up parts can effectively remove the seed potatoes between the spoons, and the vibration-cleaning device can effectively remove the excess seed potatoes in the spoon, which was significantly improved. When the eccentricity was 1.9 mm, the main drive wheel speed of the conveyor belt was 40.61 r/min, and the seed layer height was 33 cm, the replay index was 3.04%, and the missed broadcast index was 2.01%. The index was better than standard of China. According to industry standards, the effect of seed cleaning was significantly improved. The device provided a theoretical reference for improving the design of the seeding device of the scoop potato planter.

**Key words:** potato; cup-belt type seed-metering device; seed-clearing device

收稿日期: 2019-04-09 修回日期: 2019-05-25

**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)、北方马铃薯全程机械化科研基地项目(2017-A2231-230112-G1302-008)和黑龙江八一农垦大学三横三纵支持计划项目(TDJH201803)

**作者简介:** 吕金庆(1970—),男,研究员,黑龙江八一农垦大学博士生,主要从事马铃薯技术及装备研究, E-mail: ljq888886666@163.com

## 0 引言

马铃薯机械化播种是马铃薯全程机械化生产的重要环节,是实现马铃薯高产的必经之路。目前我国北方一季作区主要采用舀勺式马铃薯播种机进行播种作业,但由于清种装置工作效果不佳,易出现勺内多种和勺间夹种等问题,导致机具播种作业质量偏低,所以设计并优化清种装置具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。

清种过程是指种勺在离开喂薯区后,勺内可能有一颗以上的种薯,勺间可能夹带种薯,此时需要将多余种薯清理掉,使之落回种箱。德国 GRIMME 公司生产的马铃薯播种机排种器清种装置采用机械式振动清种,振动形式为通过杆条调节四边形不规则凸轮的间歇性振动,工作时易发生相对滑动,其振动频率不均,振动效果较差,作业状态不稳定;国内部分马铃薯播种机采用的振动清种装置为输送带带动偏心轮转动,常因工作时间长、摩擦过热,导致出现输送带断裂等现象<sup>[4-7]</sup>;青岛农业大学杨红光等研究的 2CM-4 型马铃薯播种机,可一次性实现开沟、施肥、播种、起垄和覆膜等多项工序,其单链排种器上安装有振动清种装置,可有效清除勺内多余种薯<sup>[8]</sup>。

为解决上述问题,本文设计一种清种装置,由电动机带动偏心轴套及偏心轮转动,外部的振动轮随着输送带转动,有效防止因振动轮与输送带内侧表面产生滑动摩擦而导致输送带断裂等问题。通过对振动清种和清夹带种过程的动力学分析,以及弹性引导式清种鼻的弹起曲线分析,采用对比试验和二次旋转正交组合试验的方法,分析各因素对清种效果产生的影响,通过田间试验得到清种装置最佳参数组合,在降低种薯幼芽损伤率的同时,提升清种效率。

## 1 总体结构和工作原理

### 1.1 总体结构

舀勺式马铃薯播种机排种器结构如图 1 所示,主要由电动式振动清种装置、弹性引导式清种鼻、输送带及输送带驱动轮、种箱等组成。

### 1.2 工作原理

输送带在喂薯区一侧向上运动,种勺依次舀取一或两颗薯块,勺间会随机夹带不同数目的薯块,当输送带继续向上运动到清种区时,在直流电机的作用下,振动清种装置内的偏心轮旋转,输送带与振动凸轮产生均匀振动,并传递给安装于输送带外侧的种勺,使勺内种薯进行简谐运动,当勺内含有两个或

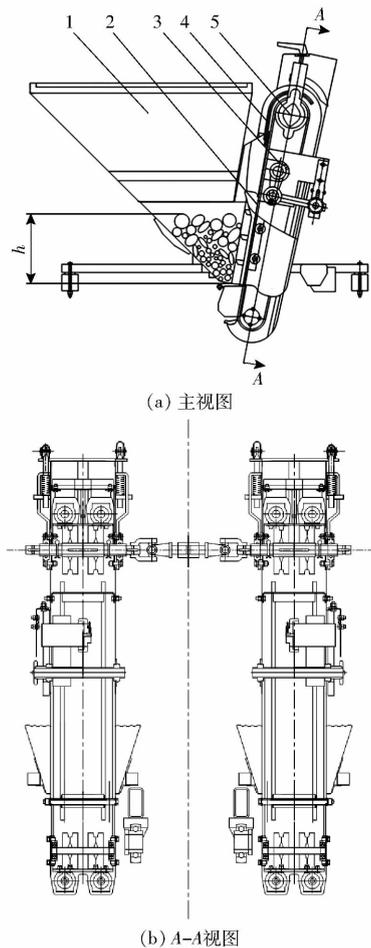


图 1 排种器结构简图

Fig. 1 Structure diagrams of seeder meter

1. 种箱
2. 输送带
3. 电动式振动清种装置
4. 弹性引导式清种鼻
5. 输送带主驱动轮

两个以上的种薯时,最上方种薯与输送带间的正压力逐渐减小为零,进而翻转,落回种箱,实现振动清种功能,而勺间夹带的种薯随着输送带运动至清种鼻鼻尖处与其碰撞,清种鼻做缓冲回弹运动,在减缓对种薯冲击力的同时,使种薯回落种箱完成清种作业,勺内种薯运动到最高点越过主驱动轮后,在重力作用下落于前一个种勺的背上,并继续向下运动至投种点,种薯失去支持力,落于种沟底部,完成一次清种后的排种作业。

## 2 关键部件设计与结构参数确定

### 2.1 电动式振动清种装置

电动式振动清种装置实物如图 2 所示,主要由微调机构和振幅调节机构组成。振幅调节机构由电机支架组合、振动调节板以及调节手轮等组成,结构如图 3 所示。电机支架组合由特制电机固定装置、横筋板以及纵筋板等组成,具有结构简单、使用周期长等优点,振动调节板和调节手轮组合具有易安装、振幅调节方便等优点,振动调节板固联在方管上,调

节板上开有 65 mm 的长孔,可均匀调节偏心轮机构与输送带间距离来改变振幅,有效提高清种效率。



图 2 电动式振动清种装置

Fig.2 Electric vibration cleaning device

振源采用直流电机带动偏心轮旋转,具有频率稳定的优点,且拖拉机均有直流电输出功能,实际作业时安装调试相对简单<sup>[9-14]</sup>。设计的微调机构结构如图 4 所示,工作时可通过微调机构调节振动清种装置,使其将输送带顶起实现均匀调整振动频率和振幅的目的,实物如图 5 所示。微调机构由直流

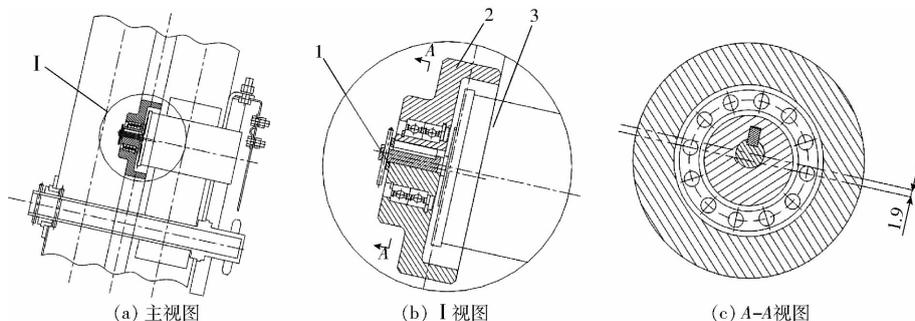
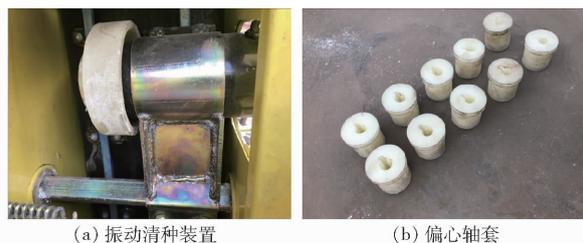


图 4 微调机构结构简图

Fig.4 Structure diagrams of fine tuning mechanism

1. 偏心轴套 2. 振动轮 3. 直流电机



(a) 振动清种装置

(b) 偏心轴套

图 5 微调机构

Fig.5 Fine tuning mechanism

## 2.2 电动式振动清种装置结构参数的确定

种薯运动至偏心轮上方,在偏心轮的作用下,位于勺内上方多余的种薯受到输送带对其的弹力使其回落至种箱,上方种薯处于平衡位置时其受力方向如图 6 所示。

勺内种薯受力为

$$\begin{cases} N_1 = G \cos \alpha + F_s + N \sin \beta_1 \\ F_n + G \sin \alpha = N \cos \beta_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $N_1$ ——输送带对种薯支持力,  $N$   
 $G$ ——种薯重力,  $N$

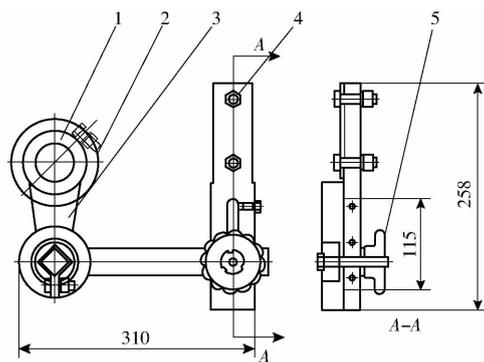


图 3 振幅调节机构结构简图

Fig.3 Structure diagram of amplitude adjustment mechanism

1. 直流电机 2. 偏心轮 3. 电机支架组合 4. 振动调节板 5. 调节手轮

电机、偏心轴套和振动轮等组成。直流电机与偏心轮同轴安装,偏心轮安装在特制的偏心轴套中,可固定偏心距。

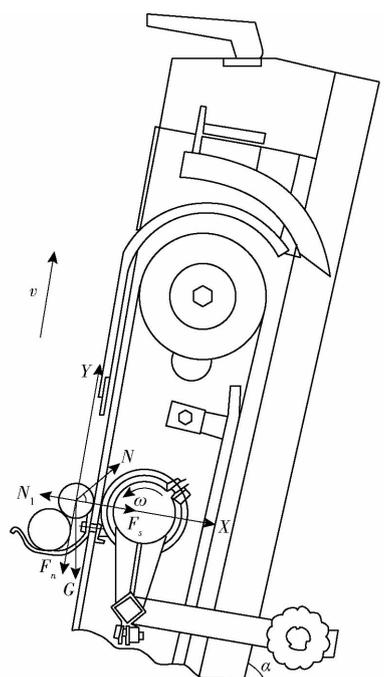


图 6 振动清种运动分析

Fig.6 Kinematic analysis of vibration seed-clearing

$F_n$ ——输送带对种薯摩擦力, N  
 $F_s$ ——下方种薯对上方种薯摩擦力, N  
 $N$ ——下方种薯对上方种薯支持力, N  
 $\beta_1$ ——下方种薯对上方种薯支持力与  $X$  轴夹角, ( $^\circ$ )  
 $\alpha$ ——排种器与水平方向夹角, ( $^\circ$ )

工作时, 种薯沿  $X$  轴做简谐振动, 当种薯与输送带间正压力为零时, 种薯受到如图 7 所示的 3 个力。

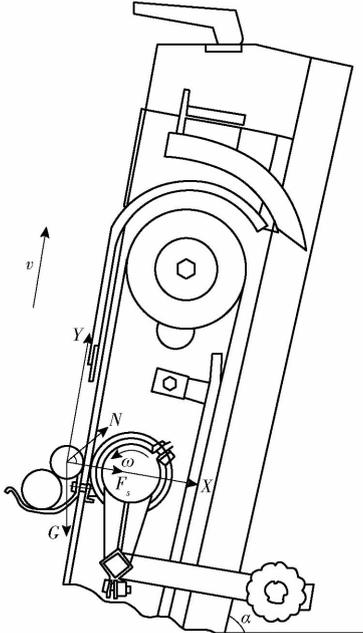


图 7 振动清种动力学分析

Fig. 7 Dynamics analysis of vibration seed-clearing

位移方程为

$$S = \lambda \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中  $S$ ——位移, m

$\omega$ ——振动角频率, rad/s

$t$ ——振动时间, s

$\lambda$ ——振幅, m

对时间  $t$  求二阶导数得

$$a_x = -\lambda \omega^2 \sin(\omega t) \quad (3)$$

其  $X$  轴方向的分力对种薯产生转矩, 使种薯翻转落回种箱。作业时, 受种薯形状和振动的影响, 重力和种薯间的支持力不能保持时刻共线的状态, 因此可以实现清种功能, 其受力方程为

$$\begin{cases} N_1 = G \cos \alpha + F_s - \frac{G}{g} \omega^2 \lambda \sin \varphi_d \\ F_s = \mu N \cos \lambda \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{其中 } \sin \varphi_d = \frac{g(\cos \alpha + \mu \sin \alpha)}{\omega^2 \lambda} \quad (5)$$

式中  $g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>

$\mu$ ——种薯间摩擦因数

$\varphi_d$ ——物料开始跳动的最小相位角, ( $^\circ$ )

引入振动强度  $K$ , 其表达式为

$$K = \frac{\omega^2 \beta}{g} \quad (6)$$

式中  $\beta$ ——振动方向振幅

可得出抛掷指数

$$P = \frac{1}{b_d} = \frac{K}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha} \quad (7)$$

式中  $b_d$ ——物料跳动指数

当抛掷指数等于 1 时, 进行振动清种, 得出偏心轮的临界偏心距

$$\lambda_1 = \frac{g(\cos \alpha + \mu \sin \alpha)}{\omega^2} \quad (8)$$

查阅机械设计手册选取直流电机转速为 600 r/min,  $\mu$  取 0.6,  $\alpha$  取  $80^\circ$ , 将数值代入式 (8), 求得偏心距为 1.8 mm, 实际作业过程中, 由于排种器安装角度等为固定参数, 常通过调节清种系统振幅和频率提高播种作业质量, 频率反映到试验时为输送带主驱动轮的转速, 根据实际作业情况, 取主驱动轮转速为 33 ~ 50 r/min, 偏心距过大会导致振动频率过高, 出现匀内无种薯的情况, 因此取偏心距为 1 ~ 3 mm。

### 2.3 弹性引导式清种鼻

弹性引导式清种鼻结构如图 8 所示, 以弹簧钢为原材料制成, 主要由托板、安装板、鼻筋骨以及鼻梁等部分组成, 具有结构简单、种薯损伤率低等优点。弹性引导式清种鼻鼻梁弯曲成图中所示形状, 可适当延长清种鼻作用于种薯的时间, 减缓清种鼻对种薯的冲击力, 鼻筋骨表面挂胶处理增大缓冲空间, 同时增加清种鼻与种薯的接触面积, 使种薯在整个清种过程中受力均匀, 根据实际作业情况, 本文设计的弹性引导式清种鼻纵向长度为 468 mm, 鼻梁弯折角度设置为  $146^\circ$ , 鼻筋骨宽为 30 mm<sup>[15-18]</sup>。

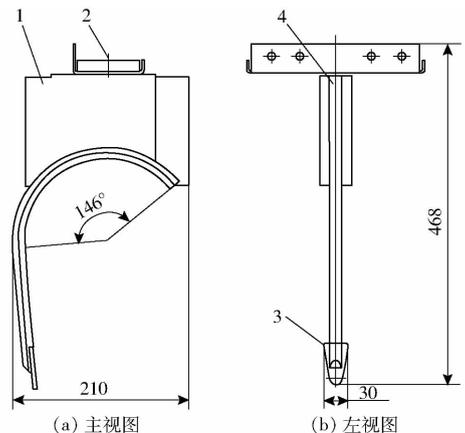


图 8 弹性引导式清种鼻结构简图

Fig. 8 Structure diagrams of elastic guided seed-clearing nose

1. 托板 2. 安装板 3. 鼻筋骨 4. 鼻梁

### 2.4 弹性引导式清种鼻结构参数的确定

建立如图 9 所示的坐标系, 夹带种薯从  $A$  点输

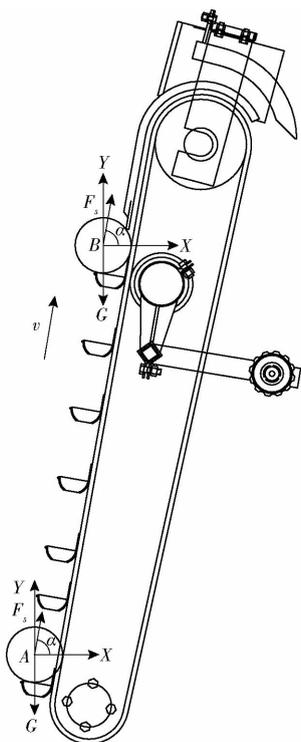


图 9 夹带种薯运动分析

Fig. 9 Kinematic analysis of entrained seed potato

送至 B 点,其轨迹方程为<sup>[19-20]</sup>

$$\begin{cases} x_{ab} = vt \cos \alpha \\ y_{ab} = vt \sin \alpha - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中  $v$ ——输送带速度, m/s

$x_{ab}$ ——A 点到 B 点 X 轴方向位移, m

$y_{ab}$ ——A 点到 B 点 Y 轴方向位移, m

夹带薯所受到的摩擦力  $F_s$  为

$$F_s = F_N \tan \alpha \quad (10)$$

其中

$$F_N = mg \cos \alpha \quad (11)$$

式中  $F_N$ ——夹带种薯受到的正压力, N

摩擦力所做的功在 Y 轴上的分量为

$$p = \int_0^{Ax_{ab}} F_N \tan \alpha dx = F_N \tan \alpha Ax_{ab} \quad (12)$$

式中  $A$ ——提升直线方程系数

根据能量守恒定律, 得出

$$A = \frac{2vt \sin \alpha - gt^2}{2vt \sin \alpha \cos \alpha} \quad (13)$$

则提升直线方程为

$$y_{ab} = \frac{2vt \sin \alpha - gt^2}{2vt \sin \alpha \cos \alpha} x_{ab} \quad (14)$$

由于清夹带种薯过程中, 速度保持不变, 有

$$F_1 = \frac{m \Delta v}{t_1} \quad (15)$$

式中  $F_1$ ——清种鼻对种薯的推力, N

$t_1$ ——清夹带薯所用时间, s

$\Delta v$ ——速度的变化量, m/s

$m$ ——单块种薯质量, kg

由式(15)可知, 种薯所受的冲击力主要取决于种子的速度变化量。排种器的清种性能主要受输送带驱动轮转速、充种角和清种角等的影响<sup>[21-23]</sup>。采用的种勺直径  $d$  为 7.2 cm, 为使种勺达到最好的充种效果, 充种区角  $\theta$  为

$$\theta > \frac{L}{\pi d} \times 360^\circ = \frac{0.05}{3.14 \times 0.072} \times 360^\circ \approx 79^\circ \quad (16)$$

式中  $L$ ——种勺深度, m

为保证良好的充种性能取  $\theta = 80^\circ$ ; 为使种薯在整个清种过程中受力均匀, 根据种勺排布位置取清种角为  $146^\circ$ , 因此清种鼻鼻梁按种薯在输送带上升的轨迹方程, 以  $146^\circ$  的角度环绕在输送带上部驱动轴上, 因此清种鼻对种薯具有恒定的推种角。

### 2.5 清种鼻弹起曲线分析

建立如图 10 所示的极坐标系, 模拟一次清种作业过程中鼻尖的运动轨迹, 并结合微分几何学列出其极坐标方程<sup>[24]</sup>, 取  $O$  为输送带主驱动轴的轴心,  $B$  为清种鼻的尖端,  $B_1$  为清种完成后鼻尖弹起的末位置,  $\rho$  为清种鼻尖端到输送带主驱动轴轴心的距离。

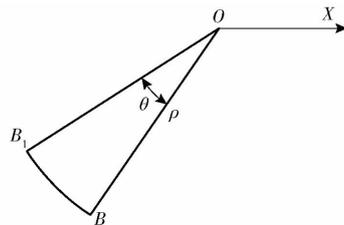


图 10 清种鼻弹起曲线模型

Fig. 10 Model of seed-clearing elastic curve

由微分几何学知

$$\tan \alpha = \frac{d\rho}{\rho d(257^\circ - \theta)} \quad (17)$$

根据设计要求, 推种角为一定值, 其中  $n$  为常数, 可得

$$\int \frac{d\rho}{\rho} = - \int n d\theta \quad (18)$$

则

$$\rho = e^{-n\theta + c_1} \quad (19)$$

式中  $c_1$ ——常数

当  $\theta = 0^\circ$  时,  $\rho = R + l_1$ ,  $R$  为输送带主驱动轴的半径,  $l_1$  为清种鼻与输送带水平间距, 可得

$$\rho = (R + l_1) e^{n\theta} \quad (20)$$

当  $\theta = \pi/2$  时,  $\rho = R + l_2$ ,  $l_2$  为种勺外端与输送带顶端相平时, 种勺外端与输送带间的距离, 则

$$n = \frac{2}{\pi} \ln \frac{R + l_2}{R + l_1} \quad (21)$$

可知  $n$  仍是常数, 则清种鼻的曲线方程为

$$\rho = (R + l_1) e^{n\theta} \quad (22)$$

为了充分发挥弹性清种鼻的性能,模拟曲线方程形状,设计清种鼻鼻筋骨如图 11 所示。

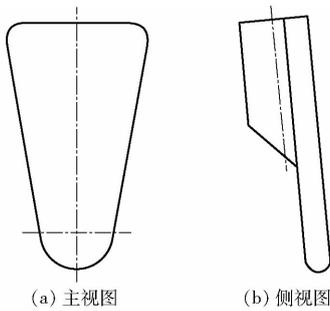


图 11 鼻筋骨结构简图

Fig. 11 Structure diagrams of nasal bone

由实际作业情况可知,匀间是否夹带种薯主要与种箱内种薯数量有关,种薯数量反映到试验时为种层高度,根据实际经验作业,种层高度为 33 ~ 100 cm,综上所述偏心轮的偏心距、输送带主驱动轮转速以及种层高度直接影响清种装置的工作性能,进而影响播种机的工作质量。

### 3 田间试验

#### 3.1 试验条件

2018 年 5 月,在东北农业大学阿城示范试验基地,进行舀勺式马铃薯排种器清种装置的田间试验。试验前进行整地作业,土壤为普通黑土,土壤坚实度为 62.6 kPa,土壤含水率为 16.8%,满足农艺要求。播种机的配套动力为 59.6 kW 拖拉机,试验品种为东农 303,种薯的平均三轴尺寸为 41.1 mm × 37.6 mm × 25.2 mm,形状指数为 201.8,平均质量为 24.56 g,平均含水率为 74.2%,净度大于 99%,振幅调节机构如图 12 所示,田间作业及测量过程如图 13 所示。



图 12 振幅调节机构

Fig. 12 Amplitude adjustment mechanism

#### 3.2 评价指标

参照 GB/T 6242—2006《种植机械 马铃薯种植机械 试验方法》规定的试验方法,考察加装振动清种和弹性引导式清种鼻装置的舀勺式马铃薯排种器的播种性能,输送带每个工作周期所运输的种薯数量直接影响排种器的工作效率,最终的具体表现形式



(a) 试验过程

(b) 结果测量

图 13 田间试验

Fig. 13 Field experiment

为排种器重播率、漏播率。本文以偏心距、输送带主驱动轮转速和种层高度为试验因素,漏播率和重播率为试验指标,进行二次正交旋转组合试验,每组试验重复 3 次,记录 3 次测量平均值;播种后,选取每次播种过程中,一行的 4 个测量段进行数据采集,每段测量 15 个种薯的间距,每两段相距 25 m,计算出重播率和漏播率,根据 NY/T 1415—2007《马铃薯种植机质量评价技术规范》中的相关规定对试验结果进行分析评定。

#### 3.3 试验方案及结果分析

##### 3.3.1 试验方案及结果

采用二次旋转正交组合试验设计方法安排试验,以漏播率和重播率为试验指标,设置各因素的水平范围为:偏心距选取 1 ~ 3 mm,输送带主驱动轮转速选取 33 ~ 50 r/min,根据试验需求,设计偏心距为 1 ~ 3 mm 的偏心轴套,在种箱内画出种箱高度刻线,进行试验时,可通过调整中间传动装置改变输送带主驱动轮的转速,达到改变振动频率的目的<sup>[25]</sup>,选取试验所需水平值,进行田间试验的过程中,可根据不同的实际情况对清种装置进行调节。通过试验,对影响漏播率和重播率的因素进行显著性分析,根据实际需要各个参数组合进行优化,由于实际试验时种层高度无法精确至小数点后两位,因此种层高度只保留整数,由于加工精度等问题偏心距保留小数点后一位,试验因素编码如表 1 所示,试验方案及试验结果如表 2 所示。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Experimental factors and codes

编码	因素		
	偏心距 $x_1/\text{mm}$	主驱动轮转速 $x_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	种层高度 $x_3/\text{cm}$
1. 682	3.0	50.0	100
1	2.6	46.6	82
0	2.0	41.5	56
-1	1.4	36.4	30
-1. 682	1.0	33.0	12

##### 3.3.2 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,并进行多元回归拟合,得到漏播率

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Test plan and experimental results

试验 编号	偏心距 $x_1/\text{mm}$	主驱动轮转速 $x_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	种层高度 $x_3/\text{cm}$	漏播率 $Y_1/\%$	重播率 $Y_2/\%$
1	1.4	36.4	30	2.0	6.7
2	2.6	36.4	30	3.4	4.3
3	1.4	46.5	30	2.5	6.4
4	2.6	46.5	30	3.4	4.0
5	1.4	36.4	82	1.5	6.7
6	2.6	36.4	82	2.6	4.9
7	1.4	46.5	82	1.9	6.2
8	2.6	46.5	82	3.0	4.7
9	1.0	41.5	56	1.6	7.6
10	3.0	41.5	56	3.7	3.8
11	2.0	33.0	56	2.1	5.2
12	2.0	50.0	56	2.5	4.9
13	2.0	41.5	12	2.9	5.1
14	2.0	41.5	100	2.1	5.8
15	2.0	41.5	56	2.4	4.7
16	2.0	41.5	56	2.4	4.7
17	2.0	41.5	56	2.4	4.8
18	2.0	41.5	56	2.3	4.7
19	2.0	41.5	56	2.4	5.1
20	2.0	41.5	56	2.4	4.9
21	2.0	41.5	56	2.5	4.7
22	2.0	41.5	56	2.5	5.0
23	2.0	41.5	56	2.5	4.9

$Y_1$ 、重播率  $Y_2$  2 个试验指标的回归方程,并检验其显著性。

(1)漏播率  $Y_1$  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,漏播率  $Y_1$  方差分析如表 3 所示。由表 3 可知,偏心距  $x_1$ 、输送带主驱动轮转速  $x_2$ 、种层高度  $x_3$ 、偏心距的二次项  $x_1^2$  对漏播率  $Y_1$  的影响极显著 ( $P < 0.01$ );偏心距和输送带主驱动轮转速的交互项  $x_1x_2$  对漏播率  $Y_1$  的影响较显著 ( $0.05 < P < 0.1$ )。其余因素对试验指标漏播率  $Y_1$  的影响不显著 ( $P > 0.1$ )。将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 3 所示。得到各因素对漏播率  $Y_1$  影响的回归方程

$$Y_1 = -2.31824 + 0.86814x_1 + 0.16054x_2 - 0.026792x_3 - 0.020797x_1x_2 - 8.08122 \times 10^{-4}x_1x_3 + 2.8522 \times 10^{-4}x_2x_3 + 0.25737x_1^2 - 1.28205 \times 10^{-3}x_2^2 + 5.60962 \times 10^{-5}x_3^2 \quad (23)$$

对上述回归方程进行失拟检验,结果如表 3 所示,试验指标和试验因素存在显著的二次关系,分析

表 3 漏播率与重播率方差分析

Tab. 3 Variance analysis coefficient of variation of missing sowing rate and replay rate

指标	变异来源	平方和		自由度		均方		F		P	
		原数据	剔除不显著因素	原数据	剔除不显著因素	原数据	剔除不显著因素	原数据	剔除不显著因素	原数据	剔除不显著因素
漏播率	模型	6.20	6.14	9	5	0.69	1.23	87.69	134.96	<0.0001***	<0.0001***
	$x_1$	4.72	4.72	1	1	4.72	4.72	601.57	518.77	<0.0001***	<0.0001***
	$x_2$	0.28	0.28	1	1	0.28	0.28	36.29	31.30	<0.0001***	<0.0001***
	$x_3$	0.97	0.97	1	1	0.97	0.97	123.93	106.87	0.0008***	0.0006***
	$x_1x_2$	0.031	0.031	1	1	0.031	0.031	3.98	3.43	0.0601*	0.0529*
	$x_1x_3$	0.00125		1		0.00125		0.16			
	$x_2x_3$	0.011		1		0.011		1.43			
	$x_1^2$	0.13	0.13	1	1	0.13	0.13	16.76	14.44	<0.0001***	<0.0001***
	$x_2^2$	0.017		1		0.017		2.17			
	$x_3^2$	0.023		1		0.023		2.92			
残差	0.10	0.15	17	15	0.007852	0.009105					
失拟差	0.067	0.12	9	7	0.013	0.013	2.99	2.98			
总和	6.30	6.30	22	22							
重播率	模型	18.82	18.81	9	7	2.09	2.69	97.02	137.70	<0.0001***	<0.0001***
	$x_1$	15.38	15.38	1	1	15.38	15.38	713.48	788.08	<0.0001***	<0.0001***
	$x_2$	0.24	0.24	1	1	0.24	0.24	11.06	12.22	<0.0001***	<0.0001***
	$x_3$	0.38	0.38	1	1	0.38	0.38	17.62	19.46	0.0006***	0.0002***
	$x_1x_2$	0.28	0.28	1	1	0.28	0.28	13.05	14.42	<0.0001***	<0.0001***
	$x_1x_3$	0.011		1		0.011		0.52			
	$x_2x_3$	0.00125		1		0.00125		0.058			
	$x_1^2$	1.60	1.60	1	1	1.60	1.60	74.29	82.06	0.0012***	0.0002***
	$x_2^2$	0.12	0.12	1	1	0.12	0.12	5.66	6.25	0.0350**	0.0250**
	$x_3^2$	0.83	0.83	1	1	0.83	0.83	38.68	42.72	0.0053***	0.0006***
残差	0.28	0.29	13	15	0.022	0.020					
失拟差	0.10	0.11	5	7	0.020	0.016	0.89	0.72			
总和	19.10	19.10	22	22							

注:\*\*\*表示极显著 ( $P < 0.01$ );\*\*表示显著 ( $0.01 < P < 0.05$ );\*表示较显著 ( $0.05 < P < 0.1$ )。

结果合理。

## (2) 重播率 $Y_2$ 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,重播率  $Y_2$  方差分析如表3所示。由表3可知,偏心距  $x_1$ 、输送带主驱动轮转速  $x_2$ 、种层高度  $x_3$ 、偏心距和输送带主驱动轮转速的交互项  $x_1x_2$ 、偏心距的二次项  $x_1^2$ 、种层高度的二次项  $x_3^2$  对重播率  $Y_2$  的影响极显著 ( $P < 0.01$ ); 输送带主驱动轮转速的二次项  $x_2^2$  对重播率  $Y_2$  的影响显著 ( $0.01 < P < 0.05$ )。其余因素对试验指标重播率  $Y_2$  的影响不显著 ( $P > 0.1$ )。将其中不显著的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项,再次进行方差分析,结果如表3所示。得到各因素对重播率  $Y_2$  影响的回归方程

$$Y_2 = 21.87272 - 6.57549x_1 - 0.33045x_2 - 0.051964x_3 + 0.012478x_1x_2 + 0.012122x_1x_3 - 9.50732 \times 10^{-5}x_2x_3 + 0.89782x_1^2 + 3.43009 \times 10^{-3}x_2^2 + 3.38455 \times 10^{-4}x_3^2 \quad (24)$$

### 3.3.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据的处理,得出偏心距、输送带主驱动轮转速、种层高度之间的显著和较显著交互作用对漏播率、重播率 2 个试验指标影响的响应曲面,如图 14、15 所示。

对于漏播率  $Y_1$ ,当种层高度达到 56 cm 时,偏心

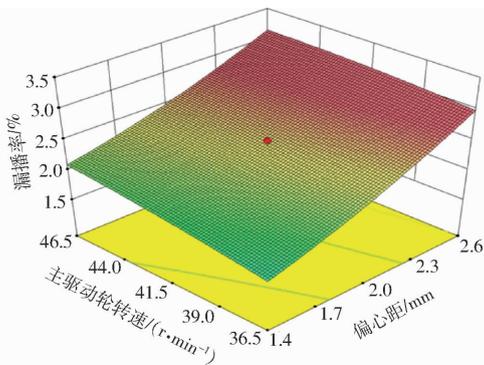


图 14 种层高度为 56 cm 时因素对漏播率的响应曲面

Fig. 14 Response surface of missing sowing rate when seed level was 56 cm

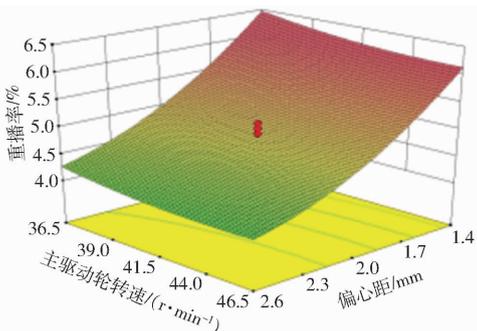


图 15 种层高度为 56 cm 时因素对重播率的响应曲面

Fig. 15 Response surface of replay rate when seed level was 56 cm

距和输送带主驱动轮转速的交互作用影响如图 14 所示。当偏心距一定时,漏播率  $Y_1$  整体随着输送带主驱动轮转速的增加呈现逐渐增加的趋势,最优的输送带主驱动轮转速范围为 36.5 ~ 39.4 r/min; 当输送带主驱动轮转速一定时,漏播率  $Y_1$  整体上与偏心距正相关,最佳距离范围为 1.4 ~ 2.0 mm,其中偏心距是影响漏播率  $Y_1$  的主要试验因素。

对于重播率  $Y_2$ ,当种层高度达到 56 cm 时,偏心距和输送带主驱动轮转速的交互作用影响如图 15 所示,当偏心距一定时,重播率  $Y_2$  随着输送带主驱动轮转速的增加呈现逐渐减小的趋势,最优的输送带主驱动轮转速范围为 38.1 ~ 44.3 r/min; 当输送带主驱动轮转速一定时,重播率  $Y_2$  与偏心距负相关,最佳距离范围为 1.8 ~ 2.4 mm。两个交互作用项中偏心距为影响试验指标的主要因素。

通过对响应曲面的分析,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对 3 个回归方程进行求解,根据播种机的实际工作条件、作业要求及相关理论的分析选择优化的约束条件。目标及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 1.4 \text{ mm} \leq x_1 \leq 2.4 \text{ mm} \\ 36.5 \text{ r/min} \leq x_2 \leq 42.6 \text{ r/min} \\ 12.5 \text{ cm} \leq x_3 \leq 100 \text{ cm} \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

对目标函数中的 3 个参数进行优化求解,能够得到多种参数组合。考虑到实际的工作要求,选择其中最优化参数组合范围:偏心距为 1.4 ~ 2.4 mm,输送带主驱动轮转速为 36.5 ~ 42.6 r/min,种层高度为 12.5 ~ 100 cm,得到漏播率的范围为 2.03% ~ 2.37%,重播率的范围为 3.4% ~ 3.9%。

### 3.4 验证试验

验证试验的试验条件和试验测试方法与上述试验相同,对经过改进设计和优化调节后的舀勺式马铃薯排种器清种装置的清种效果进行验证,并与标准作业指标进行对比,进而验证舀勺式马铃薯排种器清种装置的清种性能。

舀勺式马铃薯排种器清种装置的结构参数和作业参数的选择为:偏心距为 1.9 mm、输送带主驱动轮转速为 40.61 r/min、种层高度为 33 cm。将上述因素水平进行验证试验,其中测量结果为 3 次测量的平均值,测得重播率为 3.04%,漏播率为 2.01%,与优化所得结果基本一致,且均明显优于相关标准。其重播率、漏播率均较低,是由于偏心距足够小,输送带主驱动轮转速足够大,使振源产生的振动强度以及振动频率使勺内多余的薯块掉落,与理论公式

所得结论相一致,验证了公式的合理性。试验验证了优化参数的合理性,按照优化后的参数进行作业能够满足要求。

### 3.5 弹性引导式清种鼻性能对比分析

为验证弹性引导式清种鼻的作业性能,对未安装弹性引导式清种鼻的排种器与安装弹性引导式清种鼻的排种器进行对比试验,试验条件不变,通过调整中间传动装置,调节输送带主驱动轮转速,采用偏心距为 1.9 mm 的偏心轴套,种箱内种层高度为 33 cm,在此工况下进行 5 次田间播种试验,对比试验如图 16 所示,试验结果如表 4 所示。



图 16 清种鼻对比试验

Fig. 16 Comparative experiment of seed-clearing clear nose

表 4 试验结果

Tab. 4 Test data

主动轮转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	原排种器		新排种器	
	重播率	种薯幼芽 损伤率	重播率	种薯幼芽 损伤率
50.1	2.8	3.6	2.1	1.3
40.3	3.1	2.9	2.3	0.9
30.5	4.2	2.3	3.5	0.7

通过性能对比试验可以看出:安装弹性引导式

清种鼻的排种器,其重播率和种薯幼芽损伤率明显降低,显著提高了排种器的工作性能,实现了舀勺式马铃薯播种机精量播种的目的。

根据式(15)可以看出:清种鼻对种薯的推力与清夹带薯所用时间成反比。且根据对比试验可知原清种装置对种子的作用时间为新清种装置对种子作用时间的 1/4,因此弹性引导式清种鼻通过延长清种装置作用于种薯的时间,减小了清种装置对种子的冲击力,可有效解决因勺间夹带种薯和勺内多种而导致重播率高的问题,同时降低了种薯幼芽损伤率,大幅改善了清种性能。

## 4 结论

(1) 舀勺式马铃薯播种机排种器内安装电动式振动清种装置,可有效清除勺内多余种薯,上部安装弹性引导式清种鼻,可减少种薯回落时的冲击力,试验证明,清种装置具有良好的清种性能。通过建立振动清种过程的数学模型和清夹带种薯过程的运动学分析,得出影响清种性能的主要因素为偏心距、输送带主驱动轮转速和种层高度。该装置结构简单,针对性强,有效提升了舀勺式马铃薯播种机排种器作业时的清种效率。

(2) 田间试验结果表明,当偏心距为 1.9 mm、输送带主驱动轮转速为 40.61  $r/\min$ 、种层高度为 33 cm 时,重播率为 3.04%,漏播率为 2.01%,此时振动清种装置作业效果较好。清种鼻性能对比试验表明,安装该清种装置的排种器在降低种薯幼芽损伤率的同时有效降低了重播率,满足马铃薯种植机质量评价技术规范的相关要求。

## 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] 刘洋,高明杰,何威明,等. 世界马铃薯生产发展基本态势及特点[J]. 中国农学通报,2014, 30(20):78-86.  
LIU Yang, GAO Mingjie, HE Weiming, et al. Analysis on the basic trend and characteristics of world potatoes production [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(20):78-86. (in Chinese)
- [3] 卢肖平. 马铃薯主粮化战略的意义、瓶颈与政策建议[J]. 华中农业大学学报(社会科学版),2015(3):1-7.  
LU Xiaoping. Strategy of potato as staple food: significance, bottlenecks and policy suggestions [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2015(3): 1-7. (in Chinese)
- [4] 杨钦寿. 马铃薯种植机升运种子装置存在的问题浅析[J]. 机械工业标准化与质量,2014(9):35-37.
- [5] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J/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](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)
- [6] 牛康,周利明,苑严伟,等. 勺链式马铃薯排种器自补种系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):76-81.  
NIU Kang, ZHOU Liming, YUAN Yanwei, et al. Design and experiment on automatic compensation system of spoon-chain potato metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 76-81. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2016s012&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s012&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.012. (in Chinese)

- [7] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐,等.气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):75-86,139.  
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75-86,139. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180409&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180409&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)
- [8] 杨红光,刘志深,倪志伟,等.2CM-4型马铃薯播种机设计与试验[J].青岛农业大学学报,2017,34(2):137-140,156.  
YANG Hongguang, LIU Zhishen, NI Zhiwei, et al. Design and test of 2CM-4 type potato planter[J]. Journal of Qingdao Agricultural University, 2017, 34(2): 137-140,156. (in Chinese)
- [9] 张波屏.现代种植机械工程[M].北京:机械工业出版社,1997:298-319.
- [10] 张一峰.马铃薯旋耕起垄播种机的设计研究[J].农业机械,2014(11):138-140.
- [11] 赖庆辉,于庆旭,苏微,等.三七超窄行气吸式精密排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):102-112.  
LAI Qinghui, YU Qingxu, SU Wei, et al. Design and experiment of air-suction ultra-narrow-row device for precise *Panax notoginseng* seed metering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 102-112. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190412&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190412&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.012. (in Chinese)
- [12] 吕金庆,杨颖,李紫辉,等.舀勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(16):17-25.  
LÜ Jinqing, YANG Ying, LI Zihui, et al. Design and experiment of cup-belt type potato seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 17-25. (in Chinese)
- [13] 刘卫平.黑龙江省马铃薯脱毒种薯繁育发展现状与对策研究[D].北京:中国农业科学院,2013.  
LIU Weiping. Study on development present status and countermeasure of virus free seed potato in Heilongjiang Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. (in Chinese)
- [14] 吕金庆,孙贺,谯瀚,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?file\\_no=20171118&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171118&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018. (in Chinese)
- [15] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [16] 刘全威.马铃薯播种机播种监测与漏播补偿系统的研究[D].兰州:甘肃农业大学,2013.  
LIU Quanwei. Development of automatic monitor and loss reseeded compensation system for the potato seeder[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [17] 王俊发,马润轩,邵东伟,等.玉米根茬收获机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2012,43(6):68-72.  
WANG Junfa, MA Liuxuan, SHAO Dongwei, et al. Design and experiment of maize root stubble harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 68-72. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20120613&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120613&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.013. (in Chinese)
- [18] 成大先.机械设计手册(第三卷)[M].5版.北京:化学工业出版社,2010.
- [19] 闻邦椿.直线振动机物料运动的基本特征及运动学参数的选择与计算[J].起重运输机械,1974(4):32-49.  
WEN Bangchun. Selection and calculation of the basic characteristics and kinematics parameters of material movement on linear vibrator[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 1974(4): 32-49. (in Chinese)
- [20] 刘文忠,赵满全,王文明,等.气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J].农业工程学报,2010,26(9):133-138.  
LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 133-138. (in Chinese)
- [21] 郭胜,赵淑红,杨悦乾,等.除芒稻种摩擦特性测定[J].东北农业大学学报,2010,41(7):118-121.  
GUO Sheng, ZHAO Shuhong, YANG Yueqian, et al. Material characteristics determination of paddy kernal deawned[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(7): 118-121. (in Chinese)
- [22] 张琴,丁为民,邓丽君,等.芡实机械脱壳中的摩擦特性试验研究[J].农业工程学报,2013,29(1):56-63.  
ZHANG Qin, DING Weimin, DENG Lijun, et al. Experimental study on friction characteristics of gorgon nuts (*Euryale ferox*) in mechanical shelling[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 56-63. (in Chinese)
- [23] 王凤,刘峰,管洪波,等.吉林省中部地区马铃薯中棚种植试验[J].中国马铃薯,2013,27(2):76-79.  
WANG Feng, LIU Feng, GUAN Hongbo, et al. Planting potato in medium sized plastic tunnel in central part of Jilin Province[J]. Chinese Potato Journal, 2013, 27(2): 76-79. (in Chinese)
- [24] 梁天也,巴晓斌,时景云,等.精播丸粒化玉米种子水平圆盘式排种器清种装置的改进[J].吉林农业大学学报,2001,23(1):101-103.  
LIANG Tianye, BA Xiaobin, SHI Jingyun, et al. Improvement on cleaning device of horizontal disc type seeder for pelleted corn seed[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2001, 23(1): 101-103. (in Chinese)
- [25] 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.