

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.005

指夹式马铃薯精密排种器设计与试验

王业成¹ 高云鹏¹ 台文硕¹ 王宇¹ 吕金庆¹ 杨德秋²

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对舀勺式马铃薯排种器携种过程中种薯易受外界扰动脱离舀勺而造成漏播、清种过程清种振动强度与种薯质量不匹配而影响排种性能等问题,设计一种指夹式马铃薯精密排种器,通过控制夹板的开合与摆动进行排种作业,在携种过程中实现对种薯的可靠夹持,在清种过程中通过改变夹板对种薯的约束条件实现单粒夹持。为提高排种器作业性能,选取种床带速度、清种位移、夹板长度为试验因素,以合格指数、重播指数、漏播指数为试验指标,采用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法进行了参数优化试验,建立了各指标的回归模型,分析了各因素对合格指数、重播指数、漏播指数的影响规律。试验结果表明,当种床带速度为6.0 km/h、清种位移为9.5 mm、夹板长度为72 mm时,排种器合格指数为90.3%、重播指数为6.1%、漏播指数为3.6%,满足播种技术要求。

关键词: 马铃薯; 排种器; 精密排种; 指夹式

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0049-10

OSID:



Design and Test of Pickup Finger Potato Precision Seed Metering Device

WANG Yecheng¹ GAO Yunpeng¹ TAI Wenshuo¹ WANG Yu¹ LÜ Jinqing¹ YANG Deqiu²(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A pickup finger potato precision seed metering device was designed, because of that the traditional cup-belt potato seed metering device had some shortcoming on the seed clamping and seed transport process, and based on the opening, closing, swinging of splint in each process to control the position and movement of seed to achieve five processes of seed filling, seed clamping, seed clearing, seed transport and seed dropping, meeting the requirement of precision planting technology. The structural parameters of key components such as clamping fixture and slideway were designed and the change rule of limiting speed of seed filling and limiting position of seed cleaning was gotten by illustrating and analyzing the overall structure and working principle of each working process of the seed metering device. In order to prove the performance of pickup finger potato seed metering device, the experiment was employed through the method of quadratic orthogonal rotating center combination of three factors and five levels according to national standard (GB/T 6973—2005). In test, potato seed Dongnong 311 was selected as experimental material. Combining with extensive pre-experiment and theoretical analysis, the working speed, seed clearing shifting, length of splint were taken as the main influencing factors, and seed qualified index, multiple index, missing index were taken as the response index, the experimental research was carried out. The optimal combination of parameters were working speed of 6.0 km/h, seed clearing shifting of 9.5 mm, length of splint of 72 mm, and under the optimal combinations, the qualified index was 90.3%, the multiple index was 6.1%, and the missing index was 3.6%, the verification test was repeated five times, the results indicated that the actual test results were in agreement with the optimization results.

Key words: potato; seed metering device; precision planting; pickup finger

收稿日期: 2020-12-15 修回日期: 2021-01-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700705)和黑龙江省科学基金项目(E2018008)

作者简介: 王业成(1978—),男,副教授,主要从事农业机械装备研究,E-mail: 6wyec@163.com

通信作者: 吕金庆(1970—),男,研究员,主要从事马铃薯全程机械化技术及装备研究,E-mail: ljq88886666@163.com

0 引言

机械化播种是马铃薯机械化生产的重要环节,是实现马铃薯高产的必经之路^[1-4]。排种器是播种机的核心部件,高效、可靠的排种器是确保马铃薯种植质量与效率的关键^[5-9]。

目前我国北方一季作区马铃薯播种主要采用搭载舀勺式排种器的播种机进行作业。舀勺式排种器在携种过程中,种薯在舀勺内处于单面约束状态,易受外界振动扰动而脱离舀勺,造成漏播;清种过程中不同质量种薯受到相同的清种振动强度,影响了排种作业质量^[10-13]。为此,学者对舀勺式马铃薯排种器进行了优化改进。吕金庆等^[14]设计了一种舀勺式马铃薯播种机清种装置,降低了播种机重播指数;韩恒等^[15]分析了影响带勺式马铃薯播种机工作性能的因素,为马铃薯播种机设计及其参数调整提供了参考;黄勇等^[16]对带勺式马铃薯排种器工作参数进行了优化,提高了作业质量。

舀勺式马铃薯排种器要求舀勺几何参数与种薯大小相匹配,近年来国内外学者对马铃薯其它排种方式也进行了研究^[17-22],刘文政等^[23]基于受迫振动原理设计了一种振动排序播种装置,为微型薯等大颗粒种子相关播种装置的设计提供了参考;侯加林等^[24]设计了一种气力托勺式马铃薯精量排种器,降低了排种器高速作业时的功耗;王凤花等^[25]针对丘陵山地小地块播种需求,设计了一种单行气吸式微型薯精密播种机,降低了播种机伤种率。

本文设计一种指夹式马铃薯精密排种器,通过控制夹板的开合与摆动进行排种作业,在携种过程中实现夹板对种薯的可靠夹持,在清种过程中通过夹板摆动来改变夹板对种薯的约束状态,实现种薯的单粒夹持。

1 排种器结构与工作原理

1.1 主要结构

如图1所示,指夹式马铃薯精密排种器主要由壳体、主轴、排种盘、夹持机构、护种板、限位环、滑道、清种滚轮等组成。排种盘通过主轴安装在壳体上;夹持机构通过板簧安装在排种盘上;滑道、限位环、清种滚轮、护种板固装在壳体上。

如图1d所示,夹持机构由夹板、拐臂、滚轮、套筒、限位板、扭簧、清种开关等组成。夹板固装在拐臂端部,拐臂可转动地安装在套筒内,套筒通过板簧安装在排种盘上;滚轮可转动地安装在套筒端部,与滑道配合构成一套凸轮机构,用于控制夹板的移动;清种开关固装在拐臂尾部,与清种滚轮配合构成一

套反凸轮机构,用于控制拐臂在套筒内的转动,从而使夹板相对排种盘具有平移、转动2个自由度,夹板可分别进行开合、摆动2种运动,实现对种薯的夹持和对多余种薯的清除功能。

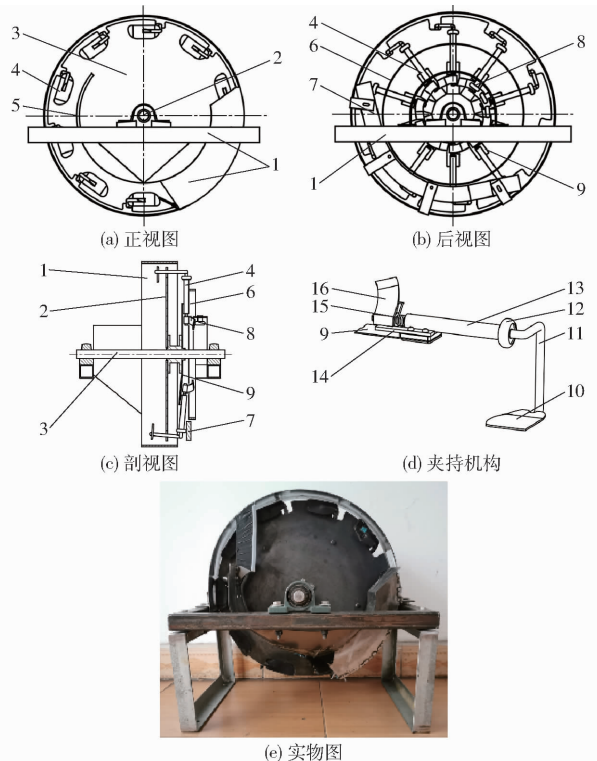


图1 指夹式马铃薯精密排种器结构图

Fig. 1 Structural drawings of pickup finger potato precision seed metering device

1.壳体 2.主轴 3.排种盘 4.夹持机构 5.护种板 6.限位环 7.滑道 8.清种滚轮 9.板簧 10.夹板 11.拐臂 12.滚轮 13.套筒 14.限位板 15.扭簧 16.清种开关

1.2 工作原理

如图2所示,排种器工作过程分为充种、夹种、清种、携种、投种5个工作过程。

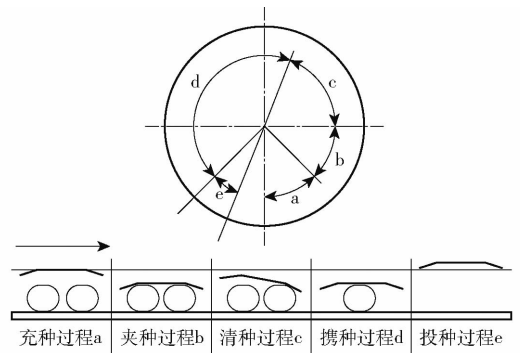


图2 工作过程示意图

Fig. 2 Working process diagram

如图3a所示,充种过程中夹持机构上的滚轮在滑道作用下带动夹持机构运动,使夹板处于开启状态,马铃薯种薯通过壳体上的进种口进入壳体内,在自身重力及种薯间相互挤压力作用下,落入到夹板、排种盘之间的夹持空间内,完成充种过程;夹持空间

内的种薯在夹板、排种盘的带动下随排种盘转动,如图 3b 所示,当夹持机构上的滚轮与滑道脱离,夹板在板簧弹力作用下闭合,将夹持空间内的种薯夹持,完成夹种过程;如图 3c 所示,清种过程中夹持机构上的清种开关依次与壳体上的 3 个清种滚轮接触、分离,当清种开关与清种滚轮接触时,清种开关带动拐臂与夹板绕套筒中心线转动,当清种开关与清种滚轮分离时,夹板等在扭簧弹力作用下绕套筒中心线反向转动,使夹板恢复到初始位置,从而实现夹板的摆动。

若夹板与排种盘之间夹持 1 个种薯,清种时夹

板的摆动仅改变夹板对种薯夹持力方向,种薯所受夹持力大小受到板簧弹力控制基本保持不变,保证了单个种薯的可靠夹持;若夹板与排种盘之间夹持 2 个种薯,夹板的摆动将使其中 1 个种薯与夹板之间的距离发生改变,如图 3c 所示,右侧种薯将失去夹板与排种盘的约束限制,夹持力变为 0,多余种薯在自身重力作用下将脱离夹持空间,完成清种过程;如图 3a 所示,投种过程中滚轮与滑道接触,带动夹持机构运动,使夹板开启,夹持空间内的种薯丧失夹持力,在自身重力作用下通过壳体上的投种口落入种沟内,完成投种过程。

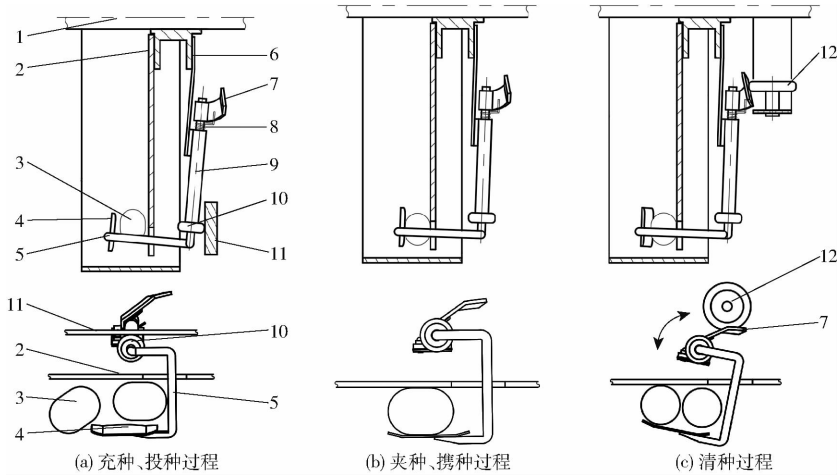


图 3 夹持机构工作原理图

Fig. 3 Working principle diagrams of clamping machine

1. 主轴 2. 排种盘 3. 种薯 4. 夹板 5. 拐臂 6. 板簧 7. 清种开关 8. 扭簧 9. 套筒 10. 滚轮 11. 滑道 12. 清种滚轮

2 关键部件设计

2.1 排种盘极限线速度

种薯从进种口进入到壳体内,在自身重力及种薯间相互挤压力作用下进入夹板与排种盘之间的夹持空间,夹板、排种盘以线速度 v 运动,当夹板边缘的种薯下落自身尺寸的 $2/3$ 时,认为充填是可靠的^[21-22,26],如图 4 所示,可知排种盘极限线速度

$$v_g = \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{4} \right) \sqrt{\frac{3g}{d}} \quad (1)$$

$$v_m = \frac{SZ}{2\pi R} v_g \quad (2)$$

- 式中 v_g ——排种盘极限线速度, m/s
 D ——相邻两夹板间的距离, m
 v_m ——播种机作业速度, m/s
 S ——播种株距, m
 Z ——夹持机构个数, 个
 d ——种薯直径, m
 R ——排种盘半径, m

由式(1)可知,当种薯直径 d 一定时,通过增大

相邻两夹板间的距离 D 可以提高排种盘极限线速度。播种株距按 200 mm 计算,综合考虑排种器整体结构尺寸不宜过大及排种器内部空间限制,选取排种盘直径为 500 mm、夹持机构个数为 10 个,由式(1)、(2)可知,此时排种盘极限线速度为 1.6 m/s,播种机极限作业速度为 7.4 km/h。

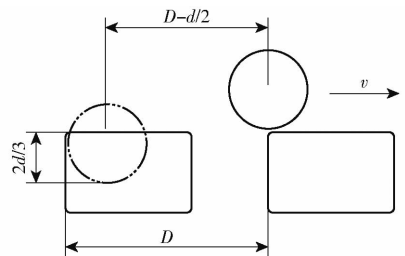


图 4 填充速度分析

Fig. 4 Analysis of seed filling speed

2.2 清种位置分析

清种时,夹持机构在清种滚轮作用下使夹板摆动,当夹板夹持 2 个种薯时,夹板摆动使其中 1 个种薯与夹板间距离发生变化,导致其丧失夹持力,在自身重力作用下以抛物线轨迹脱离夹板与排种盘之间

的夹持空间,多余种薯在下落过程中应保证不会落入护种板与壳体构成的携种通道内,避免造成重播。如图5所示,以排种盘中心为原点,建立直角坐标系,种薯下落运动方程为

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t = R \cos \theta - v_0 t \sin \theta \\ y = y_0 + v_y t = R \sin \theta + v_0 t \cos \theta - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 x_0, y_0 ——种薯脱离夹持空间时横、纵坐标, m

t ——种薯脱离夹持空间后运动时间, s

v_0 ——种薯脱离夹持空间速度(排种盘线速度), m/s

v_x, v_y ——种薯下落过程中水平、竖直方向分速度, m/s

θ ——种薯脱离位置与水平方向夹角, ($^\circ$)

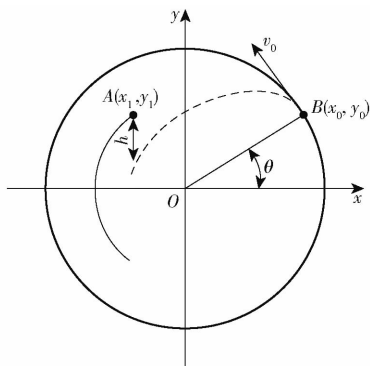


图5 种薯掉落轨迹

Fig.5 Locus of potato seed falling

如图5所示,当种薯脱离夹持空间后的下落轨迹低于护种板上端顶点 $A(x_1, y_1)$ 时,可保证种薯下落过程中不会落入护种板与壳体构成的携种通道内而造成重播,即当 $x = x_1$ 时,要求护种板上端顶点 A 与种薯的竖直距离(以下简称距离) $h = y_1 - y > 0$ 。

当护种板上端顶点 A 坐标取 $(-120 \text{ mm}, 120 \text{ mm})$ 时,由式(3)计算获得距离 h 变化曲线,如图6a所示(播种机作业速度为4、6、8、10 km/h时,排种盘线速度为0.87、1.31、1.74、2.18 m/s)。距离 h 随种薯脱离位置与水平方向夹角 θ (以下简称夹角)的增大而减小,随排种盘线速度 v_0 的增大而减小。在点 A 位置确定时,较小的夹角 θ 可以使排种器在较高的排种盘线速度下满足距离 $h > 0$,即避免多余种薯落入携种通道;较大的夹角 θ 可以增大清种过程工作区域,提高清种作业质量。

当多余种薯掉落过程中处于距离 $h = 0$ 的临界状态时,由式(3)计算获得夹角 θ 随顶点 A 纵坐标 y_1 的变化曲线,如图6b所示。夹角 θ 随护种板上端顶点 A 纵坐标 y_1 的增加先缓慢增大后减小。在相同排种盘线速度下,在顶点 A 纵坐标 y_1 为0~120 mm时,对夹角 θ 影响较小。

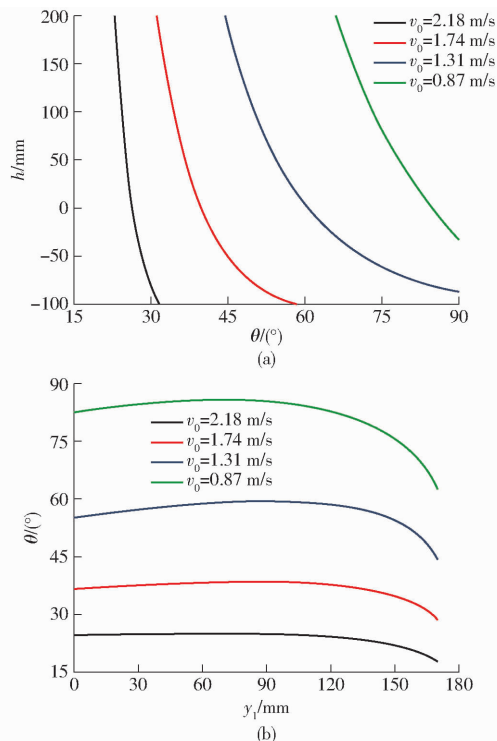


图6 距离 h 和夹角 θ 变化曲线

Fig.6 Changing curves of distance h and included angle θ

考虑壳体内种薯高度,取点 A 坐标 $(-130 \text{ mm}, 110 \text{ mm})$ 、排种盘线速度为1.31 m/s(播种机作业速度6 km/h)、夹角 θ 区间为 $0^\circ < \theta < 50^\circ$ 时,可以满足距离 $h = y_1 - y > 0$,即脱离夹持空间的种薯下落过程中不会落入携种通道内。同时在清种区域及携种通道入口处安装毛刷,提高未夹持的多余种薯分离速度,防止多余种薯进入携种通道,以降低重播指数。

2.3 夹持机构设计

夹持机构是排种器的核心工作部件,其结构参数直接影响排种器作业质量。

2.3.1 夹板

夹板与种薯直接接触,其结构参数决定夹持空间的大小,应在满足对种薯可靠夹持的条件下,减少多个种薯的夹持。

如图7a所示,夹板的长、宽分别为 l_1, b_1 。增大夹板长度 l_1 ,可以增大夹持空间长度,便于种薯夹持,提高充种性能。如图7b所示,当夹持空间内的种薯左侧与板状拐臂相接触、下侧与壳体相接触时,种薯在沿夹板平面长、宽、对角线方向可能重叠充填。当沿着夹板长度 l_1 方向夹持2个种薯时,清种过程中夹板绕套筒中心线摆动,导致左侧种薯与夹板之间的距离发生变化,使其失去夹板与排种盘约束限制而被清除。如图7c所示,夹板的对角线方向具有最大几何尺寸,当种薯沿夹板对角线方向左上右下重叠充填时,夹板摆动可以将左侧种薯2清除,

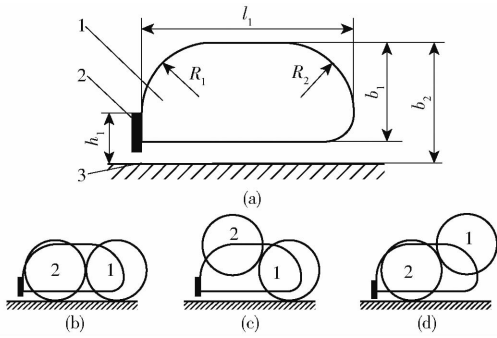


图 7 夹持状态

Fig. 7 Clamping states

1. 夹板 2. 拐臂 3. 壳体

同时适当增大夹板左上、右下圆角,减小该方向的几何尺寸,可降低重叠充填的概率;如图 7d 所示,当种薯沿夹板对角线方向左下右上重叠充填时,右侧种薯 1 将限制左侧种薯 2 脱离夹持空间,可增大夹板右上方圆角,减小该方向几何尺寸,从而减少重叠充填。结合种薯几何尺寸,取夹板宽度 b_1 为 35 mm、左上圆角 R_1 为 15 mm、右上圆角 R_2 为 20 mm,夹板长度参考现有文献选择其长度范围为大于马铃薯种薯最大几何尺寸,小于 2 倍的马铃薯种薯最小几何尺寸^[27],具体尺寸由试验确定。

为避免充种过程中夹板与种薯挤压及碰撞造成伤种,对夹板所有棱边采取倒圆角处理,并在夹板表面包裹 1 mm 厚的聚烯烃材料。

2.3.2 板簧

夹持机构通过板簧安装在排种盘上,种薯所受到的夹持力由板簧弹性形变所提供,夹持力大小确定原则为在种薯可靠夹持的条件下避免损伤。

夹持机构在夹种、携种阶段仅受到种薯对夹板的作用力 F ,夹持机构受力简图如图 8 所示。

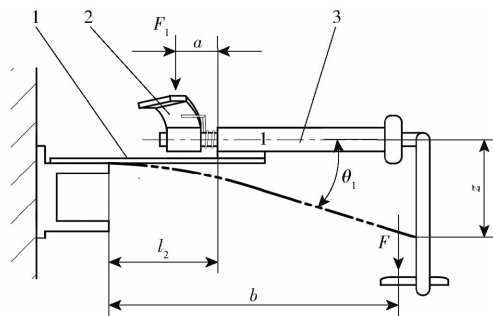


图 8 夹持机构受力分析

Fig. 8 Mechanics analysis diagram of clamping device

1. 板簧 2. 清种开关 3. 夹持机构

位移 z 、夹板转角 θ_1 及其比值为

$$z = \frac{Fb^3k}{EI} \left(\frac{k^2}{3} - k + 1 \right) \quad (4)$$

$$\theta_1 = \frac{Fb^2k}{EI} \left(1 - \frac{k}{2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{z}{\theta_1} = b \left(1 - \frac{k}{2} + \frac{k^2}{12 - 6k} \right) \quad (6)$$

其中 $k = l_2/b$

式中 l_2 ——板簧长度, m
 b ——夹持机构长度, m
 E ——板簧弹性模量, Pa
 I ——板簧惯性矩, m^4

由式(4)可知,当材料、结构参数不变时,位移 z 与种薯对夹板的作用力 F 成正比,尺寸较大的种薯将受到较大的夹持力。当位移 z 一定时,减小板簧惯性矩 I 、增加夹持机构长度 b ,可以降低种薯对夹板的作用力 F ,即降低夹持机构的刚度。选取较小的夹持机构刚度可以减小初始夹持力与最大夹持力的差值,避免夹持力大幅度变化,影响种薯夹持可靠性。

清种时,3 个清种滚轮依次与夹持机构的清种开关接触与分离,清种滚轮对清种开关作用脉动力 F_1 使夹板摆动清种。清种过程中,应减小清种滚轮对种薯夹持力的扰动,保证种薯可靠夹持。

如图 8 所示,夹持机构在清种阶段受到种薯对夹板的作用力 F 、清种滚轮对清种开关的作用力 F_1 。按照叠加法仅考虑力 F_1 引起夹板的位移 z_2 ,通过位移 z_2 变化来分析清种阶段清种滚轮对种薯夹持力 F 的影响。清种滚轮仅在力 F_1 作用时夹板位移

$$z_2 = \frac{F_1kb^2}{EI} \left(\frac{kb}{2} + \frac{ak}{2} - \frac{k^2b}{6} - a \right) \quad (7)$$

式中 a ——清种开关到套筒端部距离, m

由式(7)可知,减小清种滚轮对清种开关的作用力 F_1 ,增大板簧刚度 EI ,可以减小位移 z_2 。当清种滚轮对清种开关的作用力 F_1 一定时,选取适当的清种开关到套筒端部距离 a ,可以使位移 z_2 为 0,当力 F_1 作用于该位置时可以减小清种过程中清种滚轮对夹板位移的影响,从而减弱清种滚轮对种薯夹持力的扰动。

夹板与排种盘间的距离受限位环、滑道、板簧的控制,其中限位环限制夹板与排种盘之间最小距离,参考种薯几何尺寸,取夹板与排种盘之间最小距离为 20 mm,此时板簧提供夹持力最小,取为 2 N,从而确定夹板位移 z 的初始值(即板簧的预变形);取充种阶段夹板与排种盘之间距离为 60 mm,从而实现最小尺寸为 20 ~ 60 mm 种薯的充填与夹持;为了使种薯可靠地脱离夹持空间完成投种,投种阶段夹板与排种盘之间距离大于充种阶段,取投种阶段夹板与排种盘之间距离为 70 mm。

受排种器结构尺寸限制,取夹持机构长度 $b =$

200 mm,板簧为65号弹簧钢,其厚度为0.5 mm、宽度为32 mm、长度 $l_2=80$ mm。取夹板位移 z 为49~89 mm,此时板簧提供夹持力 F 为2.0~3.6 N。

2.4 滑道设计

夹持机构上的滚轮与滑道构成力封闭凸轮机构,控制夹持机构的开启、闭合,实现充种、夹种、投种过程,是排种器的关键控制部件。

充种阶段,夹持机构在滑道的控制下处于开启状态,夹板与排种盘构成恒定大小的充种空间;夹种阶段滚轮与滑道分离,夹板在板簧弹性力作用下闭合(回程),夹持种薯;回程过程中夹板应逐渐闭合,避免种薯受到较大冲击,减小碰撞、振动对夹种性能的影响;投种阶段夹持机构在滑道控制下开启(推程),种薯失去夹持力,在自身重力作用下从投种口落下,完成投种过程。为了保证种薯可靠脱离夹持空间,投种阶段夹板的开启位移应大于充种阶段;为了使不同几何尺寸种薯在相同位置投种,推程过程夹板开启需要有足够的打开速度,通过缩短夹板开启时间,减小投种过程对种薯下落轨迹的干扰。

推程采用一次多项式运动规律控制夹板高速开启,回程采用正弦加速度规律控制夹板低速闭合,其方程为

$$\begin{cases} S_1 = 70 \frac{\delta - 340^\circ}{10^\circ} & (340^\circ \leq \delta \leq 350^\circ) \\ S_2 = 60 \left(1 - \frac{\delta - 30^\circ}{15^\circ} + \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi(\delta - 30^\circ)}{15^\circ} \right) & (30^\circ \leq \delta \leq 45^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

式中 S_1 ——投种过程推程位移, m

S_2 ——夹种过程回程位移, m

δ ——滚轮绕主轴的旋转相位角, ($^\circ$)

3 试验

3.1 试验材料与设备

试验材料选用东北地区广泛种植的东农311马铃薯种薯,对种薯采取切芽块处理,如图9所示,具体切芽块操作为:50~60 g种薯不切块;60~100 g种薯切2块;100~150 g种薯切3块^[10],种薯几何参数如表1所示。

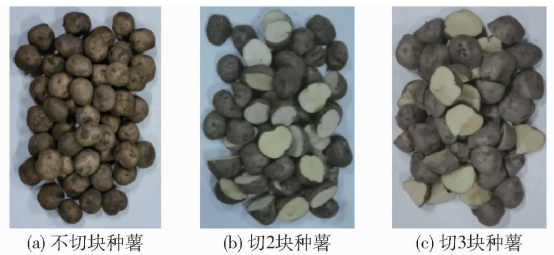


图9 试验样本

Fig.9 Test samples

表1 马铃薯种薯参数

Tab.1 Parameters of potato seed

样本	质量			最大尺寸			最小尺寸			尺寸比		
	均值/g	标准差/g	变异系数/%	均值/mm	标准差/mm	变异系数/%	均值/mm	标准差/mm	变异系数/%	均值	标准差	变异系数/%
不切块	52.1	8.0	15.4	49.5	2.9	5.9	38.9	2.7	7.0	1.3	0.1	8.7
切2块	49.5	6.7	13.6	56.8	4.6	8.1	31.2	3.1	10.0	1.8	0.2	12.8
切3块	55.5	6.4	11.5	59.6	5.4	9.1	35.6	3.7	10.5	1.7	0.3	16.0

其中种薯最大尺寸为种薯所在空间两平行面最大距离,最小尺寸为种薯所在空间两平行面最小距离,尺寸比为种薯最大尺寸与最小尺寸的比值^[28]。

试验在东北农业大学排种器实验室实施。如图10所示,试验装置主要由指夹式马铃薯精密排种器、JPS-12型排种器性能试验台组成。

3.2 试验方法

根据农艺要求选取马铃薯种薯播种理论株距为200 mm。参考GB/T 6242—2006《种植机械 马铃薯种植机 试验方法》和GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,选取种床带速度、清种位移、夹板长度为试验因素,以合格指数、重播指数、漏播指数为评价指标,其中清种位移为夹持机构受到清种滚轮作用时,夹板摆动过程中其前、后端到排种



图10 试验装置

Fig.10 Experimental device

1. 指夹式马铃薯精密排种器 2. JPS-12型排种器性能试验台

盘距离差的最大值,试验过程中,清种位移通过改变清种滚轮安装位置进行调节。采用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法,试验因素编码如表2所示。在试验过程中,每组试验重复3次,每次连续记录自排种器稳定工作时起种床带上连续排出

的 150 个种薯,取 3 次试验的平均值作为试验结果。

表 2 试验因素编码

Tab.2 Coding of experimental factors

编码	因素		
	种床带速度 $x_1/(km \cdot h^{-1})$	清种位移 x_2/mm	夹板长度 x_3/mm
1.682	7.4	15.7	90.0
1	6.8	13.0	81.9
0	6.0	9.0	70.0
-1	5.2	5.0	58.1
-1.682	4.6	2.3	50.0

3.3 试验结果与分析

3.3.1 试验结果

试验结果如表 3 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

应用 Design-Expert 软件对回归模型进行方差分析^[29],如表 4 所示,模型 P 值均小于 0.01,表明模型极显著,失拟项 P 值均大于 0.05,表明失拟项不显著,其中种床带速度对合格指数具有极显著影响,清种位移、夹板长度对合格指数具有显著影响,影响由大到小依次为种床带速度、夹板长度、清种位移;各因素对重播指数均具有极显著影响,影响由大到小依次为种床带速度、清种位移、夹板长度;各因素对漏播指数均具有极显著影响,影响由大到小依次为夹板长度、清种位移、种床带速度。略去不显著项,分别得到各指标的回归模型

$$y_1 = 90.23 - 3.96X_1 + 0.33X_2 + 0.36X_3 + 0.66X_1X_3 - 0.93X_1^2 - 2.13X_2^2 - 1.42X_3^2 \quad (9)$$

$$y_2 = 6.15 + 2.66X_1 - 2.21X_2 + 1.63X_3 + 0.46X_1X_2 + 0.49X_1^2 + 1.04X_2^2 + 0.49X_3^2 \quad (10)$$

$$y_3 = 3.53 + 1.3X_1 + 1.88X_2 - 1.99X_3 - 0.45X_1X_3 + 0.48X_1^2 + 1.13X_2^2 + 0.97X_3^2 \quad (11)$$

表 3 试验设计与结果

Tab.3 Experiment design and results

试验 序号	因素			合格指数 $y_1/\%$	重播指数 $y_2/\%$	漏播指数 $y_3/\%$
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	-1	89.6	6.2	4.2
2	1	-1	-1	80.2	11.6	8.2
3	-1	1	-1	90.0	1.3	8.7
4	1	1	-1	80.9	7.1	12.0
5	-1	-1	1	88.4	10.0	1.6
6	1	-1	1	82.7	13.1	4.2
7	-1	1	1	90.4	4.7	4.9
8	1	1	1	82.9	11.1	6.0
9	-1.682	0	0	94.4	2.9	2.7
10	1.682	0	0	81.1	12.2	6.7
11	0	-1.682	0	84.0	13.1	2.9
12	0	1.682	0	84.7	5.1	10.2
13	0	0	-1.682	86.0	4.7	9.3
14	0	0	1.682	86.7	10.4	2.9
15	0	0	0	90.7	6.2	3.1
16	0	0	0	90.4	6.0	3.6
17	0	0	0	90.1	6.4	2.7
18	0	0	0	90.2	6.2	3.6
19	0	0	0	90.4	5.3	4.2
20	0	0	0	89.3	6.7	4.0
21	0	0	0	90.0	6.9	3.1
22	0	0	0	90.9	5.8	3.3
23	0	0	0	90.0	5.8	4.2

表 4 方差分析

Tab.4 Results of variance analysis

方差 来源	合格指数				重播指数				漏播指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	337.95	9	171.57	<0.000 1	226.59	9	96.18	<0.000 1	167.22	9	66.78	<0.000 1
X_1	214.06	1	978.06	<0.000 1	96.7	1	369.42	<0.000 1	23.01	1	82.71	<0.000 1
X_2	1.47	1	6.71	0.022 4	66.58	1	254.35	<0.000 1	48.28	1	173.52	<0.000 1
X_3	1.74	1	7.96	0.014 4	36.37	1	138.94	<0.000 1	54.03	1	194.19	<0.000 1
X_1X_2	0.28	1	1.29	0.277 4	1.71	1	6.54	0.023 9	0.60	1	2.17	0.164 1
X_1X_3	3.51	1	16.04	0.001 5	0.36	1	1.38	0.261 2	1.62	1	5.82	0.031 3
X_2X_3	0.15	1	0.69	0.420 8	0.55	1	2.11	0.170 4	1.28	1	4.60	0.051 4
X_1^2	13.72	1	62.67	<0.000 1	3.78	1	14.42	0.002 2	3.60	1	12.93	0.003 3
X_2^2	72.17	1	329.75	<0.000 1	17.04	1	65.08	<0.000 1	20.28	1	72.90	<0.000 1
X_3^2	32.22	1	147.24	<0.000 1	3.78	1	14.42	0.002 2	14.97	1	53.82	<0.000 1
残差	2.85	13			3.04	13			3.62	13		
失拟	1.13	5	1.05	0.450 1	1.48	5	1.23	0.376 7	1.38	5	0.98	0.482 7
误差	1.72	8			1.92	8			2.24	8		
总和	340.79	22			229.99	22			170.84	22		

注:0.01 < P < 0.05 为差异显著, $P \leq 0.01$ 为差异极显著。

3.3.2 各因素对各指标的影响分析

如图 11a、12a、13a 所示,当清种位移取 9.0 mm 时,合格指数随种床带速度的增加而降低,重播指数随种床带速度的增加而升高,漏播指数随种床带速度的增加而升高,主要是因为当种床带速度升高时,清种过程中失去夹持力的种薯掉出夹持空间的可用时间减少,造成排种器清种性能下降,重播指数升高,同时充种过程中种薯进入夹持空间的可用时间减少,造成排种器充种性能下降,漏播指数升高。当

种床带速度取 6 km/h 时,合格指数随清种位移的增加先升高后降低,重播指数随清种位移的增加而降低,漏播指数随清种位移的增加而升高,主要是由于当清种位移较小时,夹板摆动幅度无法使多余种薯脱离夹持空间,重播指数较高,随着清种位移的增加,排种器清种性能不断增强,重播指数降低造成合格指数升高,随着清种位移进一步增大,部分夹持不牢靠的种薯,在清种过程被错误清除,导致漏播指数升高,合格指数下降。

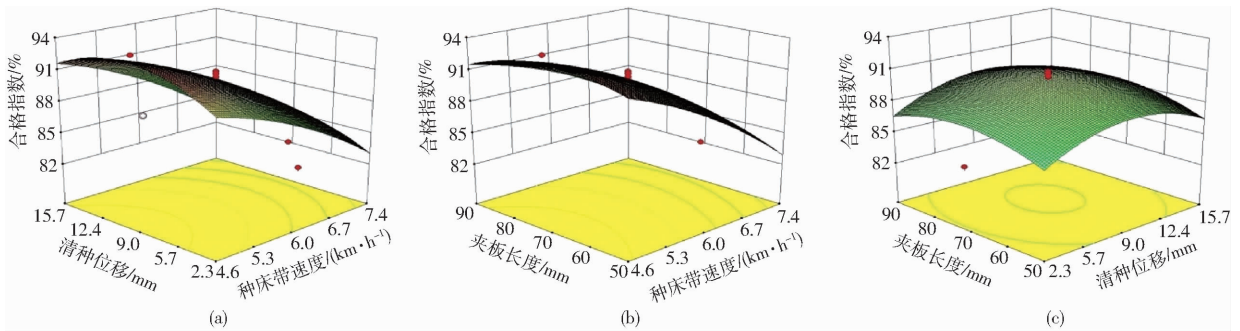


图 11 各因素交互作用对合格指数影响的响应曲面

Fig. 11 Effects of all factors on qualified index of seed metering device

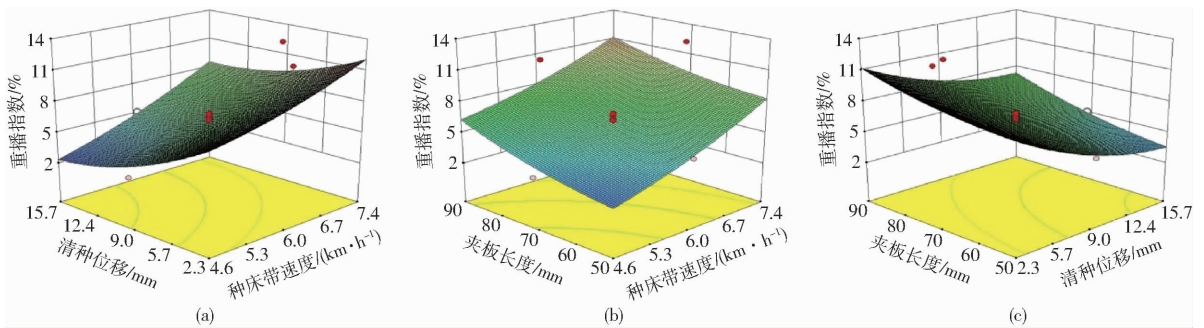


图 12 各因素交互作用对重播指数影响的响应曲面

Fig. 12 Effects of all factors on multiple-seeding index of seed metering device

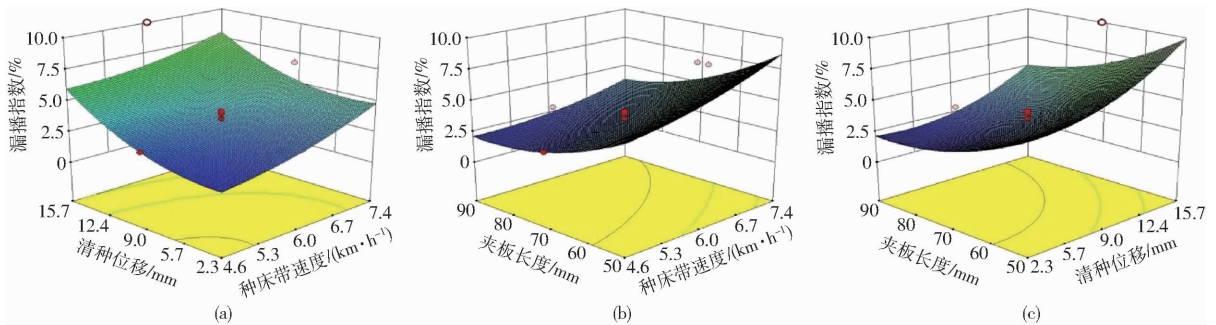


图 13 各因素交互作用对漏播指数影响的响应曲面

Fig. 13 Effects of all factors on miss-seeding index of seed metering device

如图 11b、12b、13b 所示,当种床带速度取 6 km/h 时,合格指数随夹板长度的增加先升高后降低,重播指数随夹板长度的增加而升高,漏播指数随夹板长度的增加而降低;当夹板长度取 70 mm 时,合格指数随种床带速度的上升而降低,重播指数随种床带速度的升高而升高,漏播指数随种床带速度的升高而升高。

如图 11c、12c、13c 所示,当清种位移取 9 mm 时,合格指数随夹板长度的增加先升高后降低,重播指数随夹板长度的增加而升高,漏播指数随夹板长度的增加而降低,主要是由于当夹板较短时,几何尺寸较大的种薯难以被稳定夹持,造成漏播指数升高、合格指数降低,随着夹板长度的增大,夹板与排种盘构成的夹持空间长度增大,排种器充种性能增强,使

漏播指数降低合格指数升高。随着夹板长度的进一步增大,在充种过程中夹持 2 个种薯的概率增加,在相同的清种效率下,重播指数升高、合格指数降低;在夹板长度取 70 mm 时,合格指数随清种位移的增加先升高后降低,重播指数随清种位移的增加而降低,漏播指数随清种位移的增加而升高。

3.4 参数优化与验证试验

在满足排种作业速度要求的前提下获得较大的合格指数,较小的重播指数和漏播指数,据此选取目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max y_1 \\ \min y_2 \\ \min y_3 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 6 \text{ km/h} \leq x_1 \leq 6.8 \text{ km/h} \\ 5 \text{ mm} \leq x_2 \leq 13 \text{ mm} \\ 58.1 \text{ mm} \leq x_3 \leq 81.9 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

当种床带速度 6.0 km/h、清种位移 9.5 mm、夹板长度 72 mm 时,排种器合格指数为 90.3%、重播指数为 6.2%、漏播指数为 3.5%。

为验证优化结果正确性,在上述参数组合试验

条件下,进行 5 次验证试验,得出合格指数平均值为 90.3%、重播指数平均值为 6.1%、漏播指数平均值为 3.6%,验证试验结果表明,结果可信。

4 结论

(1)设计了一种指夹式马铃薯精密排种器,通过控制夹板的开合与摆动进行排种作业,在携种过程中实现对种薯的可靠夹持,在清种过程中通过改变夹板对种薯的约束条件实现单粒夹持。

(2)对排种器主要工作过程进行了分析,获得了排种盘极限线速度和清种位置的变化规律。参考种薯几何尺寸、质量等参数,通过对夹持机构受力分析,确定了夹板、板簧等关键部件的参数。

(3)采用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法进行了参数优化试验,建立了合格指数、重播指数、漏播指数的回归模型,分析了各指标的变化规律。试验表明,当种床带速度为 6.0 km/h、清种位移为 9.5 mm、夹板长度为 72 mm 时,排种器的合格指数为 90.3%、重播指数为 6.1%、漏播指数为 3.6%,满足播种技术要求。

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] 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] 吕金庆,许剑平,杨金砖,等. 黑龙江省马铃薯生产机械化现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2009,31(8):239-241.
LÜ Jinqing, XU Jianping, YANG Jinzhan, et al. The status quo and development trend of potato production mechanization in Heilongjiang Province[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(8): 239-241. (in Chinese)
- [5] 杨然兵,杨红光,连政国,等. 马铃薯种植机分层施肥开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):104-113.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, LIAN Zhengguo, et al. Design and experiment of separated layer fertilization furrow opener for potato planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 104-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.012. (in Chinese)
- [6] 戴飞,赵武云,孙伟,等. 马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):64-72.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Design and experiment of combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 64-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170109&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.009. (in Chinese)
- [7] 戴飞,辛尚龙,赵武云,等. 全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):76-83.
DAI Fei, XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of combined potato planting machine for covering soil on top of full film surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 76-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170309&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.009. (in Chinese)
- [8] 黄勇,赵晓雪,戚江涛,等. 带勺式马铃薯排种装置的工作参数优化试验设计[J]. 农机化研究,2018,40(12):162-167.
HUANG Yong, ZHAO Xiaoxue, QI Jiangtao, et al. The rubbing cutting mechanism analysis and parameter optimization of the dragon-type straw cutting device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(12): 162-167. (in Chinese)

- [9] 刘文政,何进,李学强,等.马铃薯播种机具研究进展[J].农机化研究,2018,40(4):7-13.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Xueqiang, et al. Research progress of potato planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(4): 7-13. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 杜宏伟,尚书旗,杨然兵,等.我国马铃薯机械化播种排种技术研究与分析[J].农机化研究,2011,33(2):214-217.
DU Hongwei, SHANG Shuqi, YANG Ranbing, et al. Research and analysis on mechanized potato seed sowing techniques[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(2): 214-217. (in Chinese)
- [12] KATARZYNA R, FRANCISZEK B, RENATA G, et al. Effects of cover type and harvest date on yield, quality and cost effectiveness of early potato cultivation[J]. American Journal of Potato Research, 2015, 92(3): 359-366.
- [13] 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.
- [14] 吕金庆,王鹏榕,杨晓涵,等.勺斗式马铃薯播种机排种器清种装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(7):51-60.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, YANG Xiaohan, et al. Design and experiment of seed-clearing device for cup-belt type potato seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 51-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190705&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.005. (in Chinese)
- [15] 韩恒,陈伟,杜文亮,等.影响带勺式马铃薯播种机排种性能的因素分析与试验[J].农机化研究,2016,38(3):209-212,217.
HAN Heng, CHEN Wei, DU Wenliang, et al. Analysis and test of the factors influence the seeding performance of potato planters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(3): 209-212, 217. (in Chinese)
- [16] 黄勇,赵晓雪,戚江涛,等.带勺式马铃薯排装置的工作参数优化试验设计[J].农机化研究,2018,40(12):162-167.
HUANG Yong, ZHAO Xiaoxue, QI Jiangtao, et al. Parameter optimization experimental design of spoon-type potato seeding device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(12): 162-167. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 王希英,唐汉,王金武,等.双列交错勺带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(11):82-90.
WANG Xiying, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized Design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82-90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.011. (in Chinese)
- [20] 杨锴,段宏兵,宋波涛,等.半杯勺式马铃薯排种器的设计与试验[J].华中农业大学学报,2018,37(2):103-109.
YANG Kai, DUAN Hongbing, SONG Botao, et al. Design and trial of half-type potato seed-metering device[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(2): 103-109. (in Chinese)
- [21] 杨振宇,刘发英,朱光明,等.种薯排种器托种勺缺种的多点激光检测方法[J].农机化研究,2019,41(11):25-29.
YANG Zhenyu, LIU Faying, ZHU Guangming, et al. Detection method for seed inexistence on the seed-storage spoon of the potato seed-metering device using multi-point laser[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(11): 25-29. (in Chinese)
- [22] JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and key parameter optimization of an agitated soybean seed metering device with horizontal seed filling[J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2018, 11(2): 76-87.
- [23] 刘文政,何进,李洪文,等.马铃薯微型种薯振动排序播种装置播种性能优化[J].农业工程学报,2019,35(7):1-11.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Seeding performance optimization on vibration-arranging type seeding device for potato micro-seed[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 1-11. (in Chinese)
- [24] 侯加林,刘威,张万枝,等.气力托勺式马铃薯精量排种器设计[J].农业工程学报,2018,34(24):18-28.
HOU Jialin, LIU Wei, ZHANG Wanzhi, et al. Design of precision pneumatic cup seed-metering device for potato[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 18-28. (in Chinese)
- [25] 王凤花,孙凯,赖庆辉,等.单行气吸式微型薯精密播种机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(1):66-76.
WANG Fenghua, SUN Kai, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of minituber precision single-row air-suction planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 66-76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200107&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.007. (in Chinese)
- [26] 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:中国农业科学技术出版社,2007.
- [27] 王金武,唐汉,周文琪,等.指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(9):68-76.
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device[J/OL]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 68-76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.010. (in Chinese)
- [28] 周祖锴.农业物料学[M].北京:北京出版社,1994.
- [29] 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.