



徐子原, 孙步功, 祁渊, 张鹏. 链盘动刀式马铃薯种薯自动切块机取种装置设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(09): 167-178.
XU Ziyuan, SUN Bugong, QI Yuan, ZHANG Peng. Design and experiment of seed picking device for seed potato automatic slicing machine with chain disc moving knife[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(09): 167-178.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.09.15

链盘动刀式马铃薯种薯自动切块机取种装置设计与试验

徐子原 孙步功* 祁渊 张鹏

(甘肃农业大学 机电工程学院, 兰州 730070)

摘要 为进一步提高链盘动刀式马铃薯种薯自动切块机取种装置的作业质量, 基于EDEM-RecurDyn耦合方法对切块机取种装置作业过程进行仿真分析, 按照二次旋转正交组合试验设计, 以充种倾角、链轮转速和种层高度为影响因素, 以取种合格指数和取种损失指数为响应值, 通过预试验和单因素试验确定各因素对响应值的影响规律; 基于前期仿真试验结果开展多因素仿真试验获得取种装置最优工作参数组合, 并通过台架试验验证最优参数的可靠性。结果表明: 当种薯质量为140~210 g时, 各因素影响装置取种合格指数的主次顺序为, 链轮转速、种层高度和充种倾角, 影响取种损失指数的主次顺序为, 种层高度、充种倾角和链轮转速。基于回归模型优化得到取种装置最优工作参数为, 充种倾角29.59°、种层高度352.77 mm、链轮转速44.25 r/min; 以最优参数进行台架试验得出, 取种合格指数为94.31%, 取种损失指数4.85%, 与仿真试验预测结果相近。

关键词 马铃薯; 取种装置; DEM-MBD耦合; 仿真优化

中图分类号 S223.2

文章编号 1007-4333(2024)09-0167-12

文献标志码 A

Design and experiment of seed picking device for seed potato automatic slicing machine with chain disc moving knife

XU Ziyuan, SUN Bugong*, QI Yuan, ZHANG Peng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract In order to further improve the working quality of the seed picking device of the sprocket moving knife type automatic potato slicing machine, the working process of the seed picking device of the slicing machine was simulated and analyzed based on the EDEM-RecurDyn coupling method, and a quadratic rotation orthogonal combination experiment was designed. Taking seed filling inclination angle, sprocket speed and species height as influencing factors, seed qualification index and seed loss index as response values, the influence law of each factor on response value was determined by pre-test and single-factor test. Based on the previous simulation test results, the optimal working parameter combination of the seed selection device was obtained, and the reliability of the optimal parameters was verified by bench test. The results showed that: when the mass of seed potato was within 140 to 210 g, the primary and secondary factors affecting the qualified index of seed selection were sprocket speed, species height and seed filling inclination angle, and the primary and secondary factors affecting seed loss index were species height, seed filling inclination angle and sprocket speed. Based on the regression model, the optimal working parameters of the seed collecting device were obtained as follows: Seed filling angle 29.59°, species height 352.77 mm, sprocket speed 44.25 r/min. The bench test with the optimal parameters

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 甘肃省科技重大专项(22ZD6NA046)

第一作者: 徐子原(ORCID:0009-0007-2567-0894), 硕士研究生, E-mail: xzy_7572@163.com

通讯作者: 孙步功(ORCID:0000-0002-3507-4312), 教授, 博士生导师, 主要从事旱作农业全程机械化和林草种子加工研究, E-mail: sunbg@gsau.edu.cn

showed that the qualified index of seed selection was 94.31%, and the loss index of seed selection was 4.85%, which is close to the prediction result of simulation test.

Keywords potato; seed picking device; DEM-MBD coupling; simulation optimization

在我国马铃薯全程机械化生产中,播种、中耕、收获均已实现机械化,而种薯制备仍主要依靠人工完成,存在切块效率低、劳动强度大、生产成本高等问题^[1]。我国70%以上的马铃薯种植在欠发达地区,现有马铃薯种薯切块机体积大、价格高,不适合当下国情农情,严重制约了马铃薯产业的发展^[2-3]。链盘动刀式马铃薯种薯自动切块机具有体积小、切块流程简单、制造成本低等优点,但由于取种装置易出现盘内空种、多种甚至取种爪卡住等问题,导致切块质量下降,所以设计并优化取种装置提高取种性能具有重要意义^[4-5]。

种薯切块是马铃薯生产的重要环节,机械化切种是降低马铃薯种植成本的重要方式,取种装置作为马铃薯种薯切块机的核心部件,对切种合格率有直接影响。吕金庆等^[5]针对取种器重种率高、漏种率高及通用性差等问题,采用种勺双排交错排列布置方式,缩小了双排相邻两种勺垂直间距,提高充种性能,为马铃薯播种机取种器的相关设计提供参考。谭本芳等^[6]采用EDEM和RecurDyn耦合仿真的方法,对取种器的充种和清种过程进行仿真分析,为链勺式马铃薯取种装置的优化设计提供新的方法。牛康等^[7]使用EDEM软件建立了取种器数值模型,发现增强种薯流动性可以有效提高充种成功率。高原等^[8]设计了三爪勺式马铃薯精量取种器,通过采用二次正交回归旋转仿真试验,发现当三爪种勺取种应力变大时,在高转速条件下更具有取种优势。上述马铃薯取种装置的取种对象均为30~50 g的种薯或切块薯,而本研究取种装置取种对象为140~210 g的种薯,在满足取种需求的同时还要兼顾切种要求。

为提高取种装置的可靠性,本研究基于EDEM-RecurDyn耦合对取种装置在多体动力学系统作用下的性能进行仿真分析,采用预试验和单因素试验研究链轮转速、种层高度以及充种倾角对取种合格指数和取种损失指数的影响,确定各试验因素最佳参数组合,最后通过台架试验验证,以期使样机性能达到最佳^[9-10]。

1 取种装置结构与工作原理

本研究设计的链盘动刀式马铃薯种薯自动切

块机取种装置主要由四爪取种盘、破拱装置、隔薯板、限薯充种箱、限薯拨杆、张紧装置和弯板取种链条等组成(图1)。

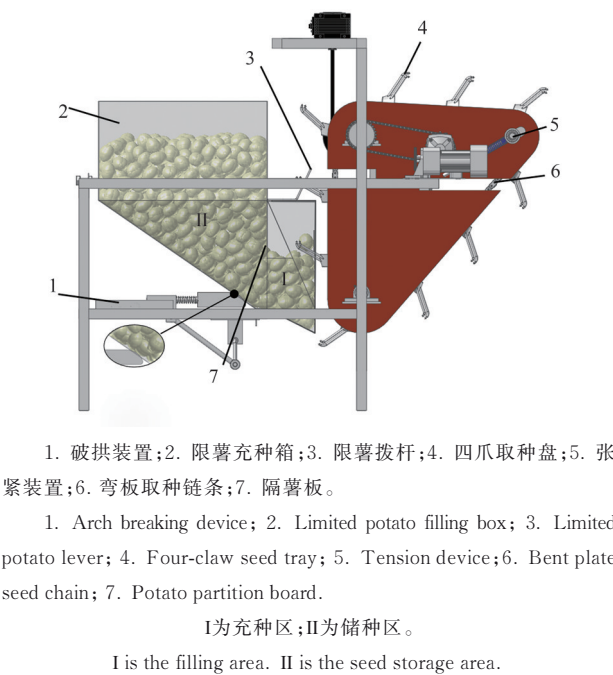


图1 取种装置结构简图

Fig. 1 Structure diagram of seed picking device

取种装置工作过程分为充种阶段、清种阶段、图像采集阶段和切种阶段。充种阶段:固定在链条上的四爪取种盘取种爪从种箱底部开口槽探入种箱内,以速度 v 自下而上穿过种层抓取种薯。清种阶段:当取种爪抓取1或2颗种薯离开种层时,在种箱前侧上边缘处与限薯拨杆交错穿过,处于取种爪边缘的种薯不受支撑被限薯拨杆拨落回种箱内,取种爪取种空间内的种薯受来自上取种爪侧方支持力作用被牢牢抓取,四爪取种盘继续向上运动,取种爪内仅存的种薯在自身重力的作用下滚入盛种盘内,或在限薯拨杆推力作用下滑入盛种盘内。图像采集阶段:进入盛种盘内的种薯随四爪取种盘继续向上移动,经过位置传感器后触发信号,相机从种薯两侧上方拍照采集种薯表面芽眼信息,将采集到的两侧轮廓图像经拼接后生成包含所切种薯的最大视角拼接图像。切种阶段:根据种薯表面芽眼

分布情况,Y型切刀在电机带动下转动一定角度避开芽眼,盛种盘携带种薯继续向上移动与切刀接触以盛种盘中心为下刀点完成切块。当充种区种薯减少后,储种区种薯在自身重力作用下进入充种区维持种层高度。为避免种薯在隔薯板下方结拱,通过破拱装置于水平面内作往复运动破坏种群平衡,其前端通过调节螺栓来控制弹簧弹力避免伤薯。

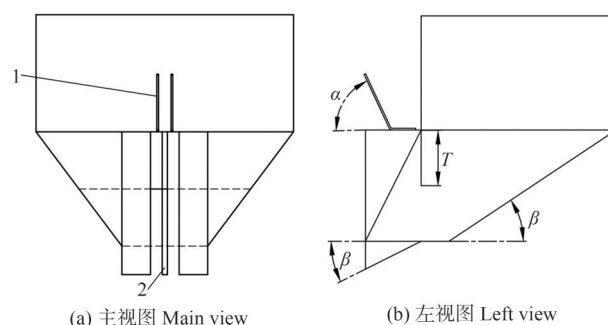
2 关键部件设计

2.1 限薯充种箱设计

种层高度是影响取种效果的重要因素之一^[11]。种层越高,取种爪充种时受到种层的阻力越大,向下翻转角度越大,此时取种爪难以充种导致空匀率增加,种层阻力增加还会使取种爪更易折断;种层高度过低,充种时间变短,取种爪难以有效充种同样导致空匀率增加,取种效率下降。为此增加隔薯板将种箱分为充种区和储种区两部分,通过调整隔薯板长度,控制充种区种薯层高度^[12-13]。

种箱底部夹角 β 越大储种区面积越大,但随着夹角 β 增大种薯流动性减弱,容易在隔薯板下方结拱。根据文献^[11]为提高种薯流动性防止种薯堆积,种箱底部夹角 β 应大于种薯堆积角 24.39° ,因此 β 取 35° 。限薯拨杆倾角 α 和充种倾角 θ 之和要大于 90° ,否则在清种阶段会产生垂直于取种爪的分力使其折断,已有研究表明充种倾角取值范围一般为 $20^\circ \sim 30^\circ$,综合考虑后确定 $\alpha=65^\circ$ ^[8]。挡薯栅板可避免种

薯在充种阶段由充种区漏出,其宽度越小,下取种爪间距 d_2 越小,越难以漏种。为保证挡薯栅板可以承受种薯群压力,在种箱内测以直径15 mm钢筋支撑情况下其最小宽度为18 mm。本研究设计的限薯充种箱见图2。



1. 限薯拨杆;2. 挡薯栅板。

1. Limited potato lever; 2. Block potato grating plate.

α 为限薯拨杆角度; β 为种箱底部夹角; T 为限薯挡板长度。

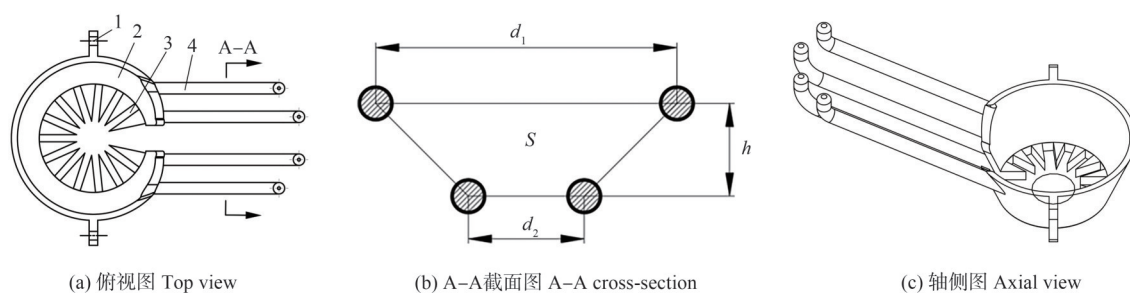
α is limit potato lever angle. β is seed box bottom angle. T is the limit of potato baffle length.

图2 限薯充种箱主视图和左视图

Fig. 2 Limited potato filling box main view and left view

2.2 四爪取种盘设计

四爪取种盘由挂耳、盛种盘、切刀槽和取种爪组成(图3),采用光敏树脂经3D打印成型。取种爪进入种层内充种,盛种盘携带种薯完成后续芽眼识别和切块,所以取种爪及盛种盘参数是取种装置设计的关键。



1. 挂耳;2. 盛种盘;3. 切刀槽;4. 取种爪。

1. Hanging ear; 2. Seed tray; 3. Cutter groove; 4. Seed picking claw.

d_1, d_2 为上下取种爪间距; h 为取种爪深度; S 为取种爪横截面积。

d_1, d_2 are the distance between the upper and lower claws. h is the depth of seed pawl. S is the cross-sectional area of seed pawl.

图3 四爪取种盘结构

Fig. 3 Four claw seed tray structure

2.2.1 取种原理分析

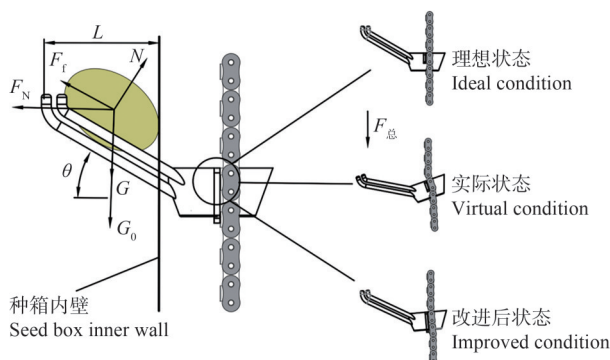
四爪取种盘取种爪进入种箱内主要依靠种箱

支持力 F_N 、种薯自身重力 G 、种层重力 G_0 、取种爪对种薯的支持力 N 和摩擦力 F_f 完成充种(图4)。取种

爪支持力 N 的分力与种箱支持力 F_N 方向相反,作用于种薯指向种箱内壁,使种薯在取种爪内更加稳定,更容易被抓取。

四爪取种盘穿过种层充种时的工作状态见图4。在理想状态下,取种爪穿过种层充种,弯板链条未发生弯曲,此时实际充种倾角与理论值一致。但在实际取种过程中,取种爪从种箱底部探入种箱内充种,在上升

穿过种层过程中受到来自种层的阻力,盛种盘挂耳与弯板链条连接处力矩增大,弯板链条虽然受张紧装置弹簧支持力的作用,但是仍然发生弯曲导致取种爪向下倾斜,充种倾角 θ 减小,大幅降低了取种爪充种能力。为此,将盛种盘挂耳加长覆盖两组弯板,增大连接处力臂减小外链节弯板处压力,可以有效改善种盘向下倾斜的状况,提高取种爪充种能力。



L 为取种爪有效充种距离; N 为取种爪对种薯的支持力; F_f 为取种爪对种薯的摩擦力; F_N 为种箱内壁对种薯的支持力; F_{Σ} 为取种爪穿过种层时所受合力; G 为种薯自身重力; G_0 为种薯所受来自种薯层上方种层的重力; θ 为充种倾角。

L is the effective filling distance of the claw. N is the supporting force of seed claw to seed potato. F_f is the friction force of seed claw to seed potato. F_N is the support of the inner wall of the seed box to the seed potato. F_{Σ} is always the resultant force when the seed claw passes through the seed layer. G is the gravity of seed potato. G_0 is the gravity of seed potato from the seed layer above it. θ is the inclination of seed filling.

图4 种薯受力分析及四爪取种盘3种工作状态

Fig. 4 The stress analysis of seed potato and the three working states of four-claw seed tray

2.2.2 四爪取种盘参数分析

人工称取质量140~210 g的马铃薯种薯(‘庄薯5号’)200颗,测得尺寸:平均长度 $L_a=83.61$ mm、最大长度 $L_{\max}=101.21$ mm、平均厚度 $T_a=55.85$ mm、最小厚度 $T_{\min}=44.23$ mm。由于挡薯栅板宽度为18 mm,则下取种爪间距 $d_2>18$ mm才能保证取种爪从种箱开口槽处穿过,与此同时,为避免漏薯应使 $d_2<T_{\min}$ 。当盛种盘底面水平时,固定在机架上的芽眼识别装置可以获取更多的种薯表面芽眼信息,且便于切刀在切种后从盛种盘底面切刀槽处穿过。为保证80%左右的种薯切块能适用,并降低重复充种率和增加充种稳定性,所以四爪取种盘参数需满足条件:

$$\begin{cases} D_1 < l \cos \theta < 2T_a \\ 18 < d_2 < T_{\min} \\ \frac{1}{3}T_a < H < \frac{1}{2}T_a \\ T_a < d_1 < 2T_a \\ L_{\max} < D_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: D_1 为盛种盘直径; l 为取种爪长度; H 为盛种盘深度; θ 为充种倾角; d_2 为上取种爪间距。

取种爪穿过种层充种过程中,因充种倾角产生指向盛种盘中心的分力,从而提高充种性能^[12]。充种倾角 θ 为20°~30°时充种应力较大,更容易取到种薯,综合机架在焊接过程中的误差及式(1)分析得: θ 取25°, $D_1=105$ mm, $l=115$ mm, $d_1=80$ mm, $d_2=25$ mm, $h=23$ mm。

3 单因素仿真试验

通过预试验发现影响取种装置性能的主要因素有充种倾角、种薯层高度和链轮转速。为确定取种装置在取种性能试验中各单因素参数取值范围,应采用仿真分析与物理试验相结合的方法,对充种倾角、种薯层高度和链轮转速进行单因素试验,研究各试验因素对取种合格指数和取种损失指数的影响规律,选取相应参数使得装置性能达到最优。

3.1 试验方法

本试验参照GB/T 6973—2005《单粒(精密)播

种机试验方法》^[14]进行。建立如下概念：取种合格，盛种盘内仅有 1 颗种薯；取种损失，盛种盘内有 2 颗或 2 颗以上种薯。

以取种合格指数(Y_1)和取种损失指数(Y_2)作为评价取种装置性能指标,并将其作为试验目标优化。计算公式如下：

$$Y_1=\frac{n_1}{N'}\times 100\% \tag{2}$$

$$Y_2=\frac{n_2}{N'}\times 100\% \tag{3}$$

式中： N' 为工作时间内穿过种层的四爪取种盘总数量； n_1 为盛种盘内有 1 颗种薯的四爪取种盘数量； n_2 为盛种盘内有 ≥ 2 颗种薯的四爪取种盘数量。

3.2 离散元模型

3.2.1 接触模型选择与参数设定

由于种薯属于散体物料,可采用 Hertz-Mindlin 模型模拟马铃薯的流动特性^[15]。四爪取种盘材料为光敏树脂,种箱和弯板链材料均为钢,仿真具体参数见表 1。

表 1 马铃薯与取种装置的离散元仿真参数
Table 1 Discrete element simulation parameters of potato and seeding device

参数 Parameters	数值 Value	来源 Source	参数 Parameters	数值 Value	来源 Source
种薯泊松比 Poisson ratio of seed potatos	0.570	[15]	光敏树脂泊松比 Poisson's ratio of photosensitive resin	0.38	[16]
种薯密度/(kg/m ³) Seed potatoes density	1 048	[15]	光敏树脂密度/(kg/m ³) Density of photosensitive resin	1 130	[16]
种薯剪切模量/MPa Shear modulus of seed potato	1.336	[15]	光敏树脂弹性模量/GPa Modulus of elasticity of photosensitive resin	3.11	[16]
钢板泊松比 Poisson ratio of steel	0.300	[15]	种薯间的碰撞恢复系数 Coefficient of restitution between seed potatoes	0.790	[15]
钢板密度/(kg/m ³) Steel density	7 800	[15]	种薯间的静摩擦因数 Coefficient of static friction of seed potatoes	0.452	[15]
钢板剪切模量/GPa Shear modulus of steel	70	[15]	种薯间的动摩擦因数 Coefficient of dynamic friction of seed potatoes	0.024	[15]
种薯与钢板碰撞恢复系数 Coefficient of restitution between seed potatoes and steel	0.710	[15]	种薯与光敏树脂碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient between seed potato and photosensitive resin	0.285	本研究测定
种薯与钢板静摩擦因数 Coefficient of static friction between seed potatoes and steel	0.445	[15]	种薯与光敏树脂静摩擦因数 Coefficient of static friction between seed potatoes and photosensitive resin	0.86	本研究测定
种薯与钢板动摩擦因数 Coefficient of dynamic friction between seedpotatoes and steel	0.269	[15]	种薯与光敏树脂动摩擦因数 Coefficient of dynamic friction between seedpotatoes and photosensitive resin	0.344	本研究测定

3.2.2 耦合仿真模型建立

为减少仿真计算量,利用 Solidworks 对取种装置模型简化,将三维模型保存为 .step 格式文件导入 RecurDyn 中建立多体动力学模型(图 5(a)),添加取种链条与链轮之间的接触和约束,设置张紧装置弹簧参

数,对链轮旋转副添加 motion 控制取种速度。通过 EDEM 与 RecurDyn 耦合接口,将模型中与马铃薯接触的部件以 wall 格式文件导入 EDEM(图 5(b)),在种箱正上方建立一个颗粒工厂,用来生成马铃薯种薯离散元模型,EDEM-RecurDyn 协同仿真模型见图 5(c)。

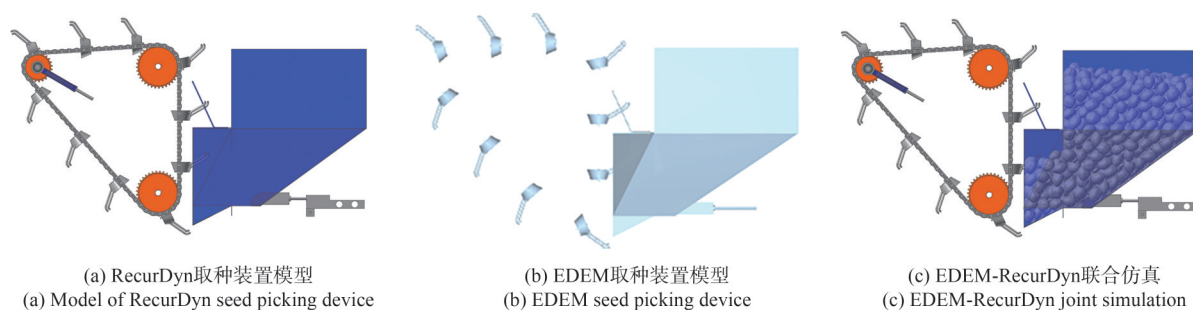


图5 EDEM-RecurDyn耦合仿真模型建立

Fig. 5 Establishment of RecurDyn-EDEM coupling simulation model

3.2.3 种薯颗粒模型建立

采用16个球面构建种薯颗粒模型(图6),设置每个球面的半径和球心坐标,将颗粒工厂建在种箱储种区正上方,按照表1设定各变量参数,生成的种薯颗粒模型质量服从正态分布,仿真时长为2 s,时间步长 2×10^{-4} s,生成颗粒500个。

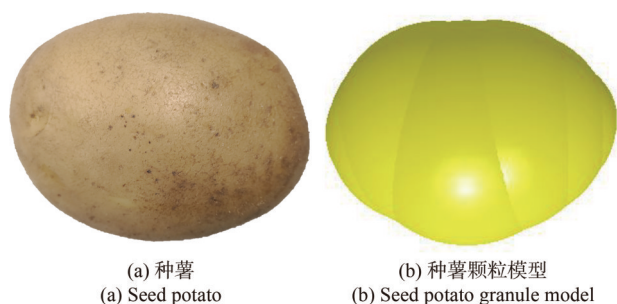


图6 种薯及其颗粒模型

Fig. 6 Seed potato and seed potato granule model

3.3 不同充种倾角对取种装置性能的影响

在一定范围内随充种倾角的增大,取种合格指数呈先增大后减小的趋势^[17-18]。为探讨四爪取种盘充种倾角对取种装置工作性能的影响规律,分别在充种倾角 θ 为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 和 40° ,链轮转速为35.00 r/min,种层高度350 mm时进行充种倾角对取种装置性能影响的单因素试验。试验结果表明(图7),随着充种倾角的增大,取种损失指数持续增大,取种合格指数先增大后减小,充种倾角为 30° 时到达峰值后下降。随着充种倾角的增大,取种爪与种箱内壁形成的夹角越来越小,充种能力增强导致重播率增加,与此同时,种薯所受支持力也会随之增加,使种薯与种箱内壁摩擦力急剧增加,不仅使取种合格指数降低,还会损伤芽眼影响播种。

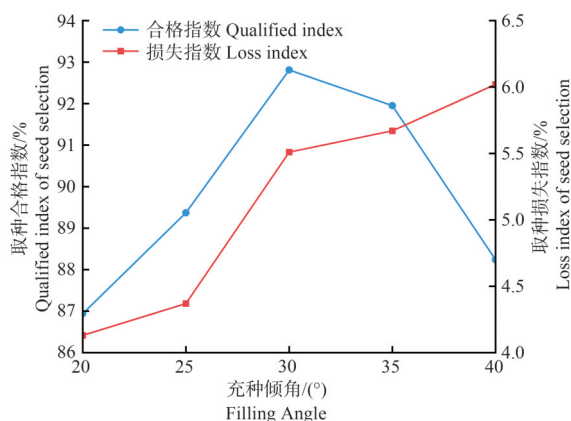


图7 充种倾角对取种装置性能的影响

Fig. 7 Effect of filling angle on the performance of seed picking device

3.4 不同链轮转速对取种装置性能的影响

在调整链轮转速进行取种仿真过程中发现,增加链轮转速可以增强种薯流动性(图8)。链轮转速越高取种爪进入种群时冲击越大,对种群的扰动越大,可以增加种群离散度,减小种薯间摩擦力、移动阻力等,可以更好地完成充种作业^[19-20]。当链轮转速超过43.75 r/min后,虽然种薯流动性仍然增强,但是种薯与取种爪之间相互作用力过大导致充种困难。本研究在RecurDyn中改变主动轮工作转速,分别在转速为26.25、35.00、43.75、52.50和61.25 r/min,充种倾角为 30° ,种层高度为350 mm时进行链轮转速对取种装置性能影响的单因素试验,试验结果见图9。

3.5 不同种层高度对取种装置性能的影响

种层高度是影响取种装置性能的重因素,将充种区种层高度控制在一定范围内,可以有效提升取种爪的充种性能^[21-22]。种层高度为450 mm时,四爪取种盘进出种层瞬间在Y轴方向的加速度峰值较高且波动剧烈(图10),表明取种爪充种时所受阻力

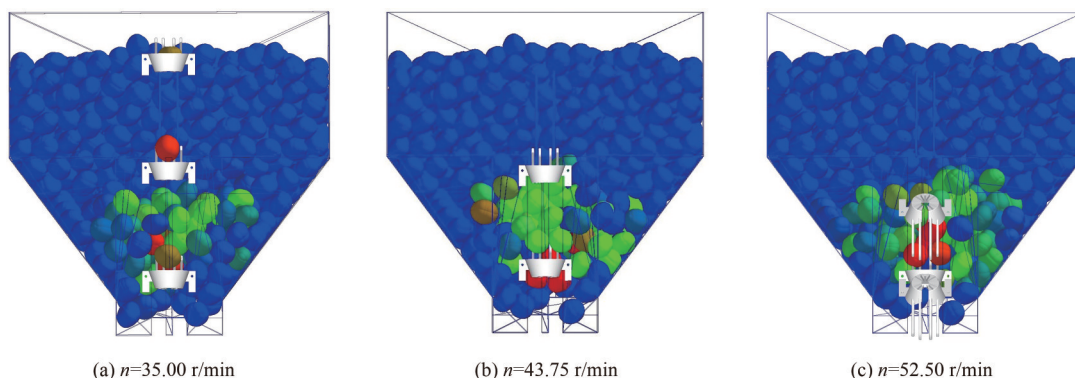


图 8 不同链轮转速(n)下的取种仿真试验

Fig. 8 Disturbance of sprockets with different speed to population

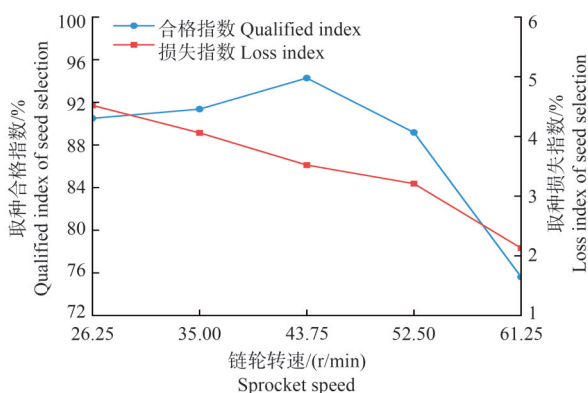


图 9 链轮转速对取种装置性能的影响

Fig. 9 Effect of sprocket speed on the performance of seed picking device

随种层高度的增加而增加,特别是在充种作业完成后离开种层的瞬间,加速度骤增易使种薯从取种爪内弹出,导致取种合格率下降。

随着种层高度逐渐增加,取种爪穿过种层充种

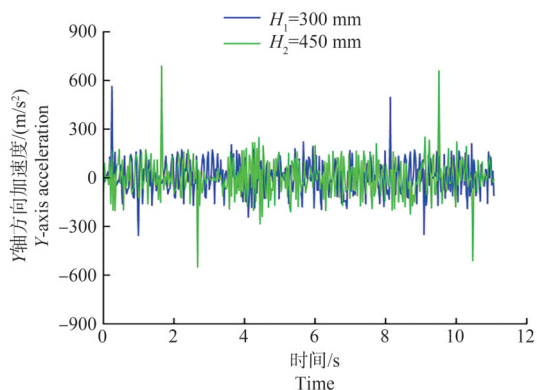


图 10 不同种层高度(H)四爪取种盘在 Y 轴方向的加速度

Fig. 10 Acceleration of four-claw seed tray in Y -axis under different species height

时间增加,种薯在取种爪内不断调整位置,可以容纳多颗体积偏小的种薯,同样导致充种合格率下降。本研究通过隔薯板将种箱分为充种区和储种区,可以通过调节隔薯板高度控制种层高度,分别在种层高度为 250、300、350、400 和 450 mm,充种倾角 30° ,链轮转速 35 r/min 时进行种层高度对取种装置性能影响的单因素试验,试验结果见图 11。

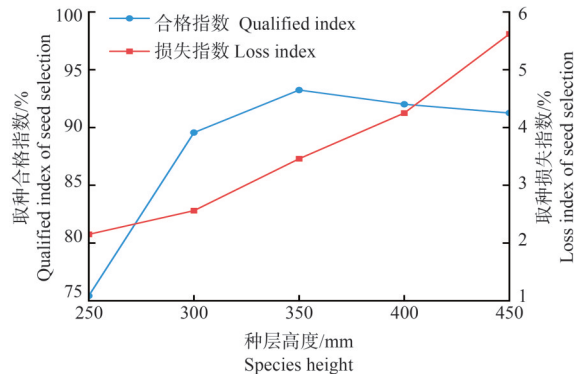


图 11 种层高度对取种装置性能的影响

Fig. 11 Effect of species height on the performance of seed picking device

4 响应曲面法试验方案

4.1 试验方案

为寻找使取种装置具有最佳工作性能的因素组合,进一步研究充种倾角、链轮转速和种层高度对取种合格指数和取种损失指数的影响,基于前期预试验和单因素试验所确定的设计参数,采用二次回归正交旋转组合试验法,进行多因素正交旋转组合仿真试验,试验方案和试验结果见表 2 和表 3。

表2 取种装置仿真试验因素与水平

Table 2 Factors and level of simulation test for seed picking device

水平 Level	因素 Factor		
	x_1 , 充种倾角/(°)	x_2 , 链轮转速/(r/min)	x_3 , 种层高度/mm
	Filling angle	Seed picking speed	Species height
1.682	38.40	58.50	434
1	35.00	52.50	400
0	30.00	43.75	350
-1	25.00	35.00	300
-1.682	21.60	29.00	266

表3 取种装置性能仿真试验方案与结果

Table 3 Performance simulation test scheme and results of seed picking device

编号 Number	因素水平 Factor level			指标 Index	
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	-1	-1	-1	90.07	7.20
2	1	-1	-1	88.91	7.32
3	-1	1	-1	92.45	6.5
4	1	1	-1	90.85	6.72
5	-1	-1	1	85.07	4.86
6	1	-1	1	88.91	5.47
7	-1	1	1	86.89	5.75
8	1	1	1	91.50	7.95
9	-1.682	0	0	86.80	5.83
10	1.682	0	0	89.41	7.73
11	0	-1.682	0	87.78	4.99
12	0	1.682	0	93.71	6.95
13	0	0	-1.682	91.57	7.63
14	0	0	1.682	87.21	4.99
15	0	0	0	93.64	5.16
16	0	0	0	93.71	5.22
17	0	0	0	94.13	5.11
18	0	0	0	93.26	4.88
19	0	0	0	92.69	4.47
20	0	0	0	93.00	5.42
21	0	0	0	93.12	5.13
22	0	0	0	93.57	4.98
23	0	0	0	93.21	5.39

注: X_1 , X_2 , X_3 分别为充种倾角、链轮转速和种层高度的水平值; Y_1 和 Y_2 分别为取种合格指数和取种损失指数。

Note: X_1 , X_2 , and X_3 are the horizontal values of filling angle, seed picking speed, and species height, respectively. Y_1 , and Y_2 are qualified index of seed selection, loss index of seed selection, respectively.

4.2 结果及分析

对试验结果进行方差分析,结果见表4。可知,取种合格指数和取种损失指数与试验因素的回归模型均极显著。取种合格指数和取种损失指数失拟项 P 分别为0.357和2.58,均不显著,表明不存在其他因素对合格指数产生影响。取种合格指数和取种损失指数模型决定性系数分别为0.97和0.93,

可见模型拟合程度较高,与实际值相差较小。去除不显著影响因素后,分别建立取种合格指数 Y_1 和取种损失指数 Y_2 对充种倾角 x_1 、链轮转速 x_2 和种层高度 x_3 的二次多项式回归方程,如下:

$$Y_1=93.4+0.738x_1+1.37x_2-1.26x_3+1.40x_1x_3-1.84x_1^2-0.91x_2^2-1.39x_3^2$$

(4)

$$Y_2=3.45+0.48x_1+0.41x_2-0.61x_3+0.33x_1x_3-0.61x_2x_3-0.33x_2^2-0.45x_3^2$$

(5)

表 4 取种装置仿真试验方差分析
Table 4 Analysis of variance of seed picking device simulation test

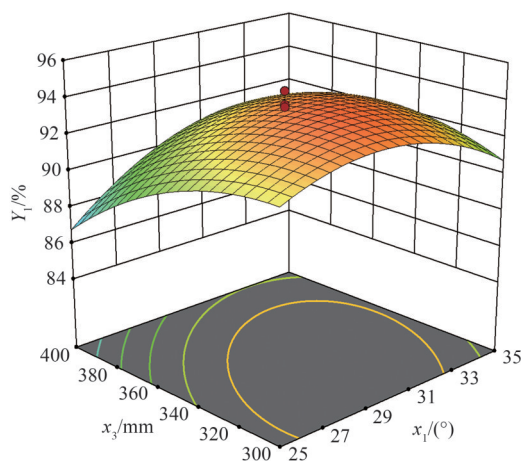
来源 Source	取种合格指数 Qualified index of seed selection				取种损失指数 Loss index of seed selection			
	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	166.704	9	62.940	0.000 1**	24.520	9	23.820	0.000 1**
x_1	7.440	1	25.270	0.035 2*	2.950	1	26.390	0.038 4*
x_2	25.610	1	87.020	0.000 1**	2.110	1	19.090	0.011 6*
x_3	21.770	1	73.960	0.000 3**	4.860	1	42.950	0.000 1**
x_1x_2	0.014	1	0.046	0.831 1	0.357	1	2.330	0.125 6
x_1x_3	16.710	1	53.370	0.016 4*	0.767	1	7.500	0.005 1**
x_2x_3	0.001	1	0.003	0.954 1	2.730	1	24.940	0.044 7*
x_1^2	53.800	1	182.780	0.017 5*	5.870	1	50.730	0.281 4
x_2^2	13.060	1	44.380	0.000 1**	1.640	1	14.530	0.025 8*
x_3^2	30.510	1	103.660	0.000 1**	3.100	1	27.060	0.021 3*
残差 Residual	3.83	13	0.394		1.730	13		
失拟项 Lack of fit	1.78	5	0.357	1.40	1.070	5	2.58	0.112 2
误差 Pureerror	2.04	8	0.255		0.663	8		
总和 Total	170.56	22			25.980	22		

注:**和*分别表示极显著($P<0.01$)和显著($0.01<P<0.05$)。
Note: ** and * indicate highly significant ($P<0.01$) and significant ($0.01<P<0.05$) respectively.

各因素影响取种合格指数的主次顺序为,链轮转速、种层高度和充种倾角,其中,链轮转速影响最为显著,充种倾角与种层高度交互作用对取种合格指数的影响见图12。当链轮转速为43.75 r/min,种层高度一定时,随着充种倾角的增大,取种合格指

数先增大后减小;当链轮转速为43.75 r/min,充种倾角一定时,随着种层高度的增大,取种合格指数先增大后减小。种层高度为340~360 mm,充种倾角在29~31°时,取种合格指数有最大值。

三因素对取种损失指数影响的主次顺序为,

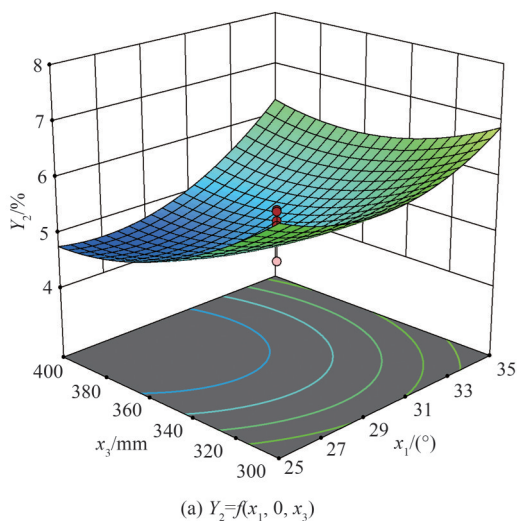


x_1 和 x_3 分别为充种倾角和种层高度,图13同。

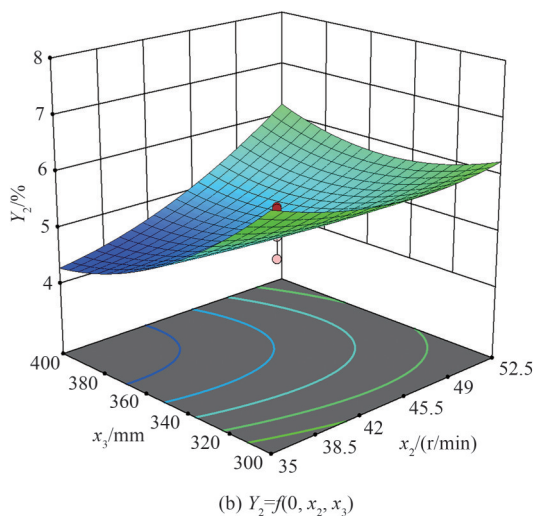
x_1 and x_3 are filling angle and species height. Same as in Fig. 13.

图12 种层高度和充种倾角交互作用对取种合格指数(Y_1)的影响

Fig. 12 Effect of interaction between species height and filling angle on qualified index of seed selection (Y_1)



(a) $Y_2=f(x_1, 0, x_3)$



(b) $Y_2=f(0, x_2, x_3)$

x_2 为链轮转速。 x_2 is the speed of seed picking.

图13 三因素交互作用对取种损失指数(Y_2)的影响

Fig. 13 Effect of interaction factors on loss index of seed selection (Y_2)

4.3 工作参数优化

以取种合格指数(Y_1)和取种损失指数(Y_2)为最终优化目标,结合各因素试验取值范围,进行参数优化,其目标函数和约束条件为:

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ Y_2 < 5\% \\ 29 \text{ r/min} < x_1 < 58.5 \text{ r/min} \\ 21.6^\circ < x_2 < 38.4^\circ \\ 266 \text{ mm} < x_3 < 434 \text{ mm} \end{cases} \quad (6)$$

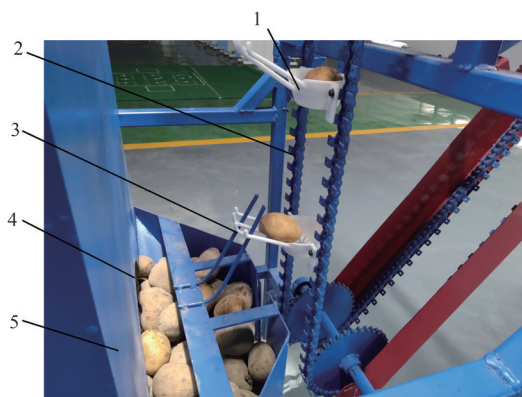
种层高度、链轮转速和充种倾角。交互因素 x_1x_3 的显著性水平 $P < 0.01$,影响极其显著;交互因素 x_2x_3 的显著性水平 $0.01 < P < 0.05$,影响显著。当链轮转速为43.75 r/min,种层高度一定时,随着充种倾角的增大,取种损失指数先减小后增大;当链轮转速为43.75 r/min,充种倾角为低水平时,取种损失指数随种层高度的增加而减小;当链轮转速为43.75 r/min,充种倾角为高水平时,随着种层高度的增加,取种损失指数先减小后增大(图13(a))。当充种倾角为 30° ,链轮转速为低水平时,取种损失指数随着种层高度增加而减小;当充种倾角为 30° ,链轮转速为高水平时,随着种层高度的增加,取种损失指数先减小后增大;当充种倾角为 30° ,种层高度为高水平时,取种损失指数随着链轮转速增加而增大;当充种倾角为 30° ,种层高度为低水平时,随着链轮转速增加,取种损失指数先减小后增大(图13(b))。

应用Design-Expert 13软件优化模块,对约束条件优化求解得到,充种倾角为 29.59° 、种层高度为352.77 mm、链轮转速44.25 r/min时,取种装置性能最优,取种合格指数为95.32%,取种损失指数4.93%。

4.4 台架试验

链盘动刀式马铃薯种薯自动切块机取种装置参数优化台架试验于2023年8月在甘肃农业大学

北方马铃薯生产全程机械化科研基地进行,台架装置见图14。因取种装置实际工作参数难以调整为理想参数,故选择一组接近于优化求解值的参数取值:充种倾角 29.00° 、链轮转速 45.00 r/min 、种薯层高度 350.00 mm 。试验过程中采用3D打印机,针对不同充种倾角分别打印出对应的四爪取种盘,通过调节隔薯板位置改变种薯层高度,采用减速电机控制链轮转速。使用手机拍摄取种装置作业过程视频,对工作时间内穿过种层的200个四爪取种盘取种情况进行检测,台架试验结果显示:取种合格指数为 94.31% ,取种损失指数为 4.85% 。



1. 四爪取种盘;2. 弯板取种链条;3. 限薯拨杆;4. 隔薯板;5. 限薯充种箱。

1. Four-claw seed plate; 2. Bent plate seed chain; 3. Limited potato lever; 4. Potato partition board; 5. Limited potato filling box.

图14 取种试验台架装置

Fig. 14 Seed test bench device

5 结 论

本研究基于马铃薯种薯切块农艺要求和取种需求,设计了一种马铃薯种薯取种装置。对装置关键作业部件进行结构和参数设计,应用DEM-MBD耦合仿真方法,采用预试验和单因素仿真试验,以充种倾角、链轮转速和种层高度为影响因素,以取种合格指数和取种损失指数为响应值,探究各因素对响应值的影响规律。采用二次回归正交旋转组合试验方法确定了取种装置实际工作过程中较优参数组合为:充种倾角 29.59° 、种薯层高度 352.77 mm 、链轮转速 44.25 r/min 。台架试验结果表明,在此参数组合下,取种合格指数为 94.31% ,取种损失指数为 4.85% ,与仿真试验预测结果取种合格指数 95.32% ,取种损失指数 4.93% 基本一致,满足马铃薯种薯取种要求。

参考文献 Reference

- [1] 刘文政,何进,李洪文,李学强,郑侃,魏忠彩. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125-135, 142
Liu W Z, He J, Li H W, Li X Q, Zheng K, Wei Z C. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 125-135, 142 (in Chinese)
- [2] 陈志伟. 基于YOLOX的马铃薯种薯芽眼检测与自动切块试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022
Chen Z W. Research on the detection and automatic cutting test of seed potato buds based on YOLOX [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [3] 冯伟,李平,张先锋,钟巍然,王攀,崔晋波. 马铃薯种薯智能切块机设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(12): 124-129, 134
Feng W, Li P, Zhang X F, Zhong W R, Wang P, Cui J B. Design and experiment of intelligent cutting machine for potato seed [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(12): 124-129, 134 (in Chinese)
- [4] 吕金庆,温信宇,李紫辉,李季成,刘中原. 马铃薯种薯切块机分级装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 76-83
Lü J Q, Wen X Y, Li Z H, Li J C, Liu Z Y. Design and experiment of the grading device for a potato seed cutting machine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(20): 76-83 (in Chinese)
- [5] 吕金庆,杨颖,李紫辉,田忠恩,尚琴琴,吴金娥. 舀勺式马铃薯播种机取种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 17-25
Lü J Q, Yang Y, Li Z H, Tian Z E, Shang Q Q, Wu J E. Design and experiment of cup-belt type potato seed-metering device [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(16): 17-25 (in Chinese)
- [6] 谭本芳,段宏兵,付锦,孙海军,蔡奎奎,李章蓝. 基于RecurDyn-EDEM耦合的三角链杯勺式马铃薯取种器性能仿真[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(3): 218-227
Tan B F, Duan H B, Fu J, Sun H J, Cai X K, Li Z L. Performance simulation of triangle Chain cup-spoon potato seed feeder based on RecurDyn-EDEM coupling [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(3): 218-227 (in Chinese)
- [7] 牛康,苑严伟,罗敏,刘阳春,吕程序,方宪法. 双层种箱式马铃薯取种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 32-39
Niu K, Yuan Y W, Luo M, Liu Y C, Lü C X, Fang X F. Design and experiment of potato metering device with double-deck seed tank [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(20): 32-39 (in Chinese)
- [8] 高原,黄玉祥,李鹏,张仕林,郑智旗. 三爪勺式马铃薯精量取种器设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(12): 191-197
Gao Y, Huang Y X, Li P, Zhang S L, Zheng Z Q. Design and experiment of three-claw spoon type potato precise metering device [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2023, 45(12): 191-197 (in Chinese)
- [9] 陈志鹏. 三角链半杯勺式马铃薯精密播种机的设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019
Chen Z P. Design and research of triangular chain half cup spoon-shaped potato precision planter [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [10] 郭军海,石林榕,赵武云,柏永祥,饶昱,曲浩. 弹性吸种垫式滚轮取种器试验与参数优化[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(8): 80-92

- Guo J H, Shi L R, Zhao W Y, Bai Y X, Rao G, Qu H. Experimentation and parameter optimisation of a flexible seed-suction pad type roller seeder[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(8): 80-92 (in Chinese)
- [11] 蔡会. 带勾式马铃薯播种机种箱优化设计与研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022
- Cai H. Optimization design and research on seed box of potato planters with cup[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022 (in Chinese)
- [12] 韩建锋, 杜娟慧, 顾昕, 刘立超, 李兆东, 刘超. 小麦分引组合式双行宽条带导种装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(11): 35-46
- Han J F, Du J H, Gu X, Liu L C, Li Z D, Liu C. Design and test of the separate and combined double row wide strip seed guiding device for wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(11): 35-46 (in Chinese)
- [13] 吕金庆, 朱明芳, 竹筱歆, 李季成, 苏文海, 刘中原. 气吸式马铃薯播种机一体式风机优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(3): 80-90
- Lü J Q, Zhu M F, Zhu X X, Li J C, Su W H, Liu Z Y. Optimal design and experiment of integrated fan of air suction potato planter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(3): 80-90 (in Chinese)
- [14] GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
- GB/T 6973—2005 Single seed drill test method [S]. Beijing: China Standards Press, 2006 (in Chinese)
- [15] 石林榕, 孙伟, 赵武云, 杨小平, 冯斌. 马铃薯种薯机械取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 L R, Sun W, Zhao W Y, Yang X P, Feng B. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6): 35-42 (in Chinese)
- [16] 徐海波. 基于 EDEM 和 RecurDyn 的联合收获机键式逐稿器分离过程协同仿真[D]. 镇江: 江苏大学, 2021
- Xu H B. Co-simulation of separating process of straw walker of combine harvester based on EDEM and RecurDyn [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021 (in Chinese)
- [17] Li C, Cui T, Zhang D X, Yang L, He X T, Li Z M, Jing M S, Dong J Q, Xing S L. Design and experiment of a centrifugal filling and cleaning high-speed precision seed metering device for maize [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426: 139083
- [18] 赵熙. 页岩压裂裂纹三维起裂与扩展行为的数值模拟与实验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017
- Zhao X. Numerical simulation and experimental study on three dimensional crack initiation and propagation of shale stimulated by hydro-fracture[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2017 (in Chinese)
- [19] 耿爱军, 杜金源, 张智龙, 张姬, 张万枝, 梅志勇. 马铃薯取种器种层扰动控制方法研究进展及展望[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(4): 113-121
- Geng A J, Du J Y, Zhang Z L, Zhang J, Zhang W Z, Mei Z Y. Research progress and prospect of seed layer disturbance control methods for potato seed metering device [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(4): 113-121 (in Chinese)
- [20] 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 S S, Wang C G, Deng W G. Collision damage test and acceleration characteristic analysis of potato [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(1): 163-169 (in Chinese)
- [21] 王希英, 唐汉, 王金武, 吕金庆, 李紫辉. 双列交错勾带式马铃薯精量取种器优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 82-90
- Wang X Y, Tang H, Wang J W, Lü J Q, Li Z H. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 82-90 (in Chinese)
- [22] 李涛, 杨敏丽, 张雄, 张恩贵, 程兴田, 汪孝林. 西北地区马铃薯机械化生产技术与差异性研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 307-313
- Li T, Yang M L, Zhang X, Zhang E G, Cheng X T, Wang X L. Study on mechanized production technology and difference of potato in Northwest China [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S1): 307-313 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 徐子原, 中共党员, 甘肃农业大学硕士研究生, 作为负责人参加第九届中国国际互联网+创新创业大赛国赛和“天鹅杯”第九届国际大学生智能农业装备创新大赛国赛, 申报并完成甘肃省优秀研究生“创新之星”项目(2022CXZX-671)。



通讯作者简介: 孙步功, 中共党员, 教授, 博士生导师。主要研究方向为旱作农业全程机械化、林草种子加工等。主持、参与完成国家自然科学基金、科技部科技成果转化项目等各类项目 10 余项, 获甘肃省科技进步三等奖 1 项(2/10), 发表论文 50 余篇, 以第一发明人授权国家发明专利 7 项。获甘肃省教学成果奖二等奖 1 项(1/10)、厅级奖 1 项(2/7); 负责的“农业机械化及其自动化创新创业教育教学团队”获批省级教学团队; 主编教材 7 部。