doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.013

亲本种子精选机导向束种装置优化设计与试验

毕于彬[1,2]　宋庆斌[2]　刘　磊[2]　刘雨婷[2]　朱净雨[2]　付作立[2]　黄玉祥[1,2]　周济兴[3]

（1.西北农林科技大学海南研究院，三亚 572000；2.西北农林科技大学机械与电子工程学院，杨凌 712100；
3.郑州度风科技有限公司，郑州 450000）

摘要：针对亲本种子精选机种子流均匀性差导致的识别率和剔除率低的问题，提出了对种子进行路径引导和约种成束的技术思路，设计了一种新型导向束种装置。合理规划了待检种子的运移轨迹，对种子进行了受力和动力学分析，进而确保落种点位与速度方向稳定。完成了引导弧面和波浪形滑槽的结构参数设计，明确了影响落种均匀性的关键参数和取值范围。通过单因素和多因素仿真试验确定了导向束种装置的最优结构参数组合。结果表明，当引导弧面半径为 26 mm，平均入种轨迹偏移量为 23.75 mm，平均脱离速度角为 15.64°时，具有良好的导向效果；当凹槽宽度为 3.0 mm、凹槽深度为 1.5 mm、凹槽半径为 2.0 mm 时，落种均匀性达到最优，落种量均匀性和落种轨迹稳定性变异系数分别为 4.83% 和 14.33% 。在此基础上，开展了性能验证与对比试验。结果表明，增设有导向束种装置的亲本种子精选机落种量均匀性变异系数为 4.97% 、带出比为 0.19，较传统装置分别减少了 8.07 个百分点和 0.07；识别率为 97.81% 、剔除率为 95.25% ，较传统装置分别增加了 4.13、4.49 个百分点，采用导向束种装置可显著提高亲本种子精选机的作业性能。

关键词：亲本种子精选机；种子流；轨迹约束；离散元仿真

中图分类号：S226.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)09-0138-10　　**OSID**：

Design and Test of Seed Guiding Constraint Device for Parent Seed Selection Machine

BI Yubin[1,2]　SONG Qingbin[2]　LIU Lei[2]　LIU Yuting[2]　ZHU Jingyu[2]　FU Zuoli[2]
HUANG Yuxiang[1,2]　ZHOU Jixing[3]

(1. *Hainan Institute of Northwest A&F University*, *Sanya* 572000, *China*
2. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *China*
3. *Zhengzhou Dofine Technology Co.*, *Ltd.*, *Zhengzhou* 450000, *China*)

Abstract: Aiming to address the problem of low recognition and rejection rates caused by poor seed flow uniformity in parent seed selection machines, a technical approach of guiding seed paths and constraint seeds was proposed and a type of seed guiding constraint device was designed. The transport trajectory of the seeds to be inspected was rationally planned and the force and dynamic analysis of the seeds was conducted to ensure the stability of the seed drop point and velocity direction. The structural parameters of the guiding arc surface and the wavy chute were designed, and the key parameters and their value ranges that affected the uniformity of seed drop were clarified. The optimal combination of structural parameters for the seed guiding constraint device was determined through single-factor and multi-factor tests. The results showed that when the radius of the guiding arc surface was 26 mm, the average seed trajectory offset was 23.75 mm and the average detachment velocity angle was 15.64°, which had a good guiding effect. When the groove width was 3.0 mm, the groove depth was 1.5 mm and the groove radius was 2.0 mm, the uniformity of seed drop reached the optimum, and the coefficients of variation for the uniformity of the seed amount and the stability of the seed drop trajectory were 4.83% and 14.33%, respectively. Based on this, performance verification and comparison tests were carried out. The results showed that the parent seed selection machine with the seed guiding constraint device had the coefficients

收稿日期：2025-12-05　修回日期：2026-01-12

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD2000401)

作者简介：毕于彬(2000—)，男，博士生，主要从事现代农业装备与技术研究，E-mail：biyubin@nwafu.edu.cn

通信作者：黄玉祥(1979—)，男，教授，博士生导师，主要从事现代农业装备与技术研究，E-mail：hyx@nwsuaf.edu.cn

of variation for the uniformity of the seed amount of 4.97% and the carry-out ratio of 0.19, which were reduced by 8.07 percentage points and 0.07, respectively, compared with the traditional device. The recognition rate was 97.81% and the rejection rate was 95.25%, which were increased by 4.13 and 4.49 percentage points, respectively, compared with the traditional device. The use of the seed guiding constraint device can significantly improve the operation performance of the parent seed selection machine. This research can provide technical support for the design and application of parent seed selection machines.

Key words: parent seed selection machine; seed flow; trajectory constraints; discrete element simulation

0　引言

热区气候条件独特，南繁育种对亲本种子具有高纯度、高净度和高精度的要求。亲本种子精选分级是现代种业加工处理中的关键环节，在热区智慧农业发展中尤为重要[1-2]。国内外研究人员对机械分选设备的研究已经较为深入，如采用比重式、风力式、振动式分选等[3-5]。近年来，机器视觉技术因其无损检测的特点已被广泛应用于作物种子品质与品种检测[6-8]。种子精选机可根据颜色和形状等表型特征去除霉变、破损、干瘪种子或异物，从而提高种子的质量。

种子精选机的工作流程一般包括给料、识别和分选 3 个步骤[9]。研究人员针对识别和分选开展了较为深入的研究。在识别方面，主要聚焦于识别检测模型的优化[10-13]。在分选方面，主要开发了气吸和气吹两种快速剔除装置[14-15]。然而，种子的运动轨迹偏移和随机无序碰撞易导致检测区出现某个通道种子量过多、种子重叠、落种姿态各异的现象，加重了识别和剔除装置的负担。落种不均匀的问题制约着种子精选机分选合格率的提高。因此，亟需提高给料过程中种子流的均匀性。

常见的给料方式主要为振动给料，可提供稳定的给料速度。振动给料器一般搭配斜置滑槽或皮带输送两种装置，保证种子在进入检测区与分选区时形成均匀种子流[16-17]。ZHAO 等[18-20]利用离散元仿真和神经网络预测的方法研究水稻种子在振动盘上的运移机理，提高了种子分布均匀性。闫泽民[21]利用仿真方法研究了滑槽对玉米种子流动特性的影响。上述研究多侧重于振动源优化和局部结构调整，尚未将滑槽结构优化设计作为调控种子流均匀性的核心手段。

为此，本文结合上述问题以及水稻亲本种子特点，提出对种子进行路径引导和约种成束的技术思路，设计一种新型导向束种装置，以保证种子以相似姿态均匀通过检测区和分选区。通过分析导向束种过程中待检种子的受力和运动状态，确定导向束种装置的关键参数。采用仿真试验对参数进行优化，并开展性能验证试验，以期提高水稻亲本种子精选机的识别与剔除精度，为热区智慧育种与精准农业装备的发展提供技术支持。

1　整机结构与工作原理

1.1　亲本种子精选机整体结构

亲本种子精选机整体结构如图 1 所示，主要由外壳体、进种装置、导向束种装置、气吹剔种装置、视觉相机、良种通道、劣种通道、储气罐、主控机和显示屏等组成。

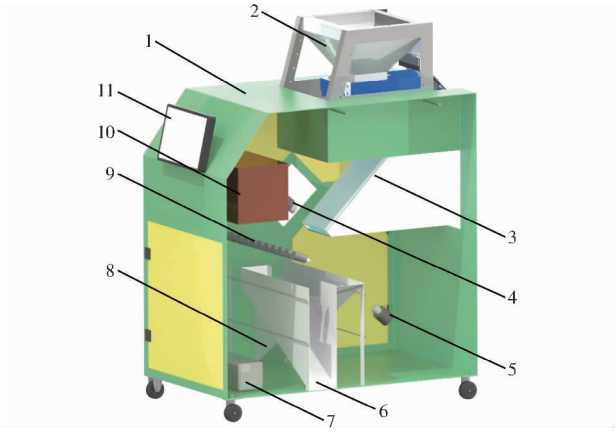

图 1　亲本种子精选机整体结构图

Fig. 1　Overall structure of parent seed selection machine

1. 外壳体　2. 进种装置　3. 导向束种装置　4. 前置视觉相机　5. 后置视觉相机　6. 良种通道　7. 储气罐　8. 劣种通道　9. 气吹剔种装置　10. 主控机　11. 显示屏

进种装置安装在外壳体顶部，下方设置导向束种装置，确保形成均匀种子流。视觉相机包括前置和后置视觉相机，分别设置在导向束种装置与良种、劣种通道之间种子流的两侧。气吹剔种装置设置在种子流路径斜上方。储气罐为气吹执行动作提供稳定气源。整机由主控机进行集中控制，显示屏实时显示工作参数与运行状态，构成人机交互界面。

1.2　导向束种装置结构

导向束种装置结构如图 2 所示，主要由振动给料器、自净气吹机构、气缸安装板、进种挡板、护种板、振动盘、波浪形滑槽、稳流限位板等组成。振动盘尾部设置有引导弧面，引导种子平稳下落到波浪形滑槽。波浪形滑槽采用周期性凸脊-凹槽结构设

计,对种子进行导向与约束,避免种子发生横向位移,确保落种均匀性。稳流限位板的作用是限制种子在滑槽上产生弹跳运动,使其平稳运移到波浪形滑槽底部落种点位。自净气吹机构在振动给料器输送每一批次种子的最后,清理振动盘上的残留种子,提高工作效率并保证装置的自净率。进种挡板设置在振动盘尾部的上方,在下一批次种子进入振动给料器时处于关闭状态,防止种子因初始速度过快以及碰撞作用提前进入到滑槽,影响上一批次种子。自净气吹机构和进种挡板保证了装置的自净率,避免了不同批次种子发生品种混杂。此设计很好地满足了亲本种子精选分级装备中的 100% 自净要求,这也是与商品种子加工作业要求的最大区别。

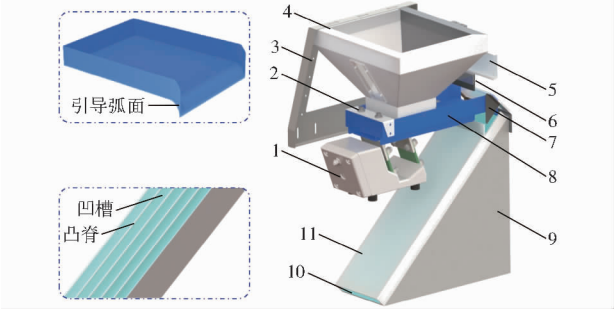

图 2 导向束种装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of seed guiding constraint device

1. 振动给料器 2. 自净气吹机构 3. 进种斗安装架 4. 进种斗 5. 气缸安装板 6. 进种挡板 7. 护种板 8. 振动盘 9. 滑槽安装座 10. 波浪形滑槽 11. 稳流限位板

1.3 工作原理

亲本种子精选机的工作原理如图 3 所示,其工作区域可分为进种区、导送区、检测区、分选区和出种区 5 部分。精选机开始运行时,进种挡板打开。在进种区,进种斗中的待检种子在振动给料器直线振动作用下被向前输送。在导送区,振动盘尾部的引导弧面和护种板引导保护种子平稳掉落到波浪形滑槽,种子在滑槽的凸脊约束作用下,沿凹槽以长轴方向稳定下滑运移,实现种子流均匀、不分散、不堆叠的作业效果。种子离开滑槽底部后进入检测区,经视觉相机采集、系统识别、气吹剔除之后,良种和劣种分别进入各自的收集通道。气吹剔种装置共设置 53 个高速气体喷阀,每个喷阀对应 2 个滑槽。

2 关键部件设计

2.1 种子运移轨迹规划

合理规划种子运移轨迹是确保落种效果可靠的关键,也是导向束种装置设计的重要依据[22]。如图 4 所示,待检种子由进种至落种的过程可分为 3

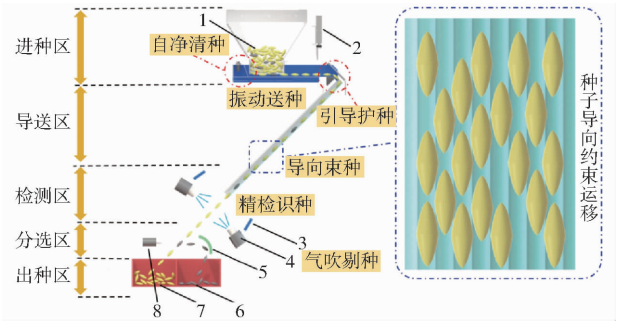

图 3 亲本种子精选机工作原理图

Fig. 3 Working principle of parent seed selection machine

1. 待检种子 2. 进种挡板 3. 背景相机 4. 视觉相机 5. 弧形挡板 6. 劣种 7. 良种 8. 高速气体喷阀

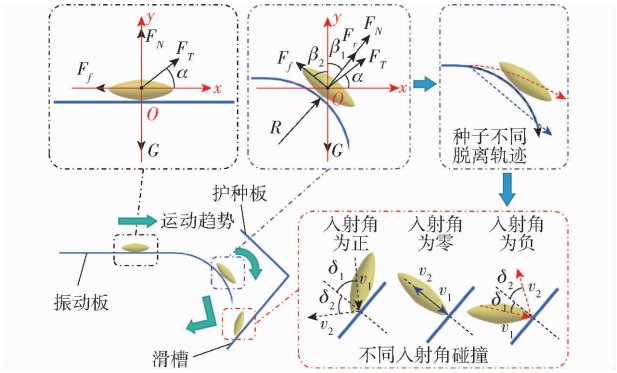

图 4 种子导向运移轨迹规划与力学分析

Fig. 4 Trajectory planning and mechanical analysis of seed guided transport

个阶段,分别为振动送种、引导护种和导向束种。振动送种阶段为待检种子运移的起始阶段,受振动盘的约束作用作直线运动。本文以黄华占水稻种子为例进行理论分析。以种子中心为原点 O,振动盘水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴建立 xOy 坐标系。种子在振动送种阶段受重力 G、摩擦力 F_f、支持力 F_N和推力 F_T的共同作用,其受力方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = F_T\cos\alpha - F_f = F_T(\cos\alpha - \mu\sin\alpha) - \mu mg \\ \sum F_y = F_N + F_T\sin\alpha - G = F_N + F_T\sin\alpha - mg \end{cases} \tag{1}$$

式中 m——种子质量,kg

g——重力加速度,m/s^2

α——推力 F_T与 x 轴之间的夹角,(°)

μ——种子与装置之间的摩擦因数

由式(1)可知,种子的运动趋势主要受推力 F_T和夹角 α 的影响,二者的值取决于振动盘的振幅方向与大小。

在振动盘尾部,种子进入引导护种阶段。此时,种子的理想运动轨迹为沿引导弧面下滑。这种运动状态可保证种子进入滑槽时稳定在各自的轨道上。种子在引导弧面上的受力方程为

$$\begin{cases}\sum F_x = F_N\sin\beta_1 + F_T\cos\alpha + F_r\sin\beta_1 - F_f\sin\beta_2 = \\ \quad F_N(\sin\beta_1 - \mu\sin\beta_2) + F_T\cos\alpha + m\dfrac{v_e^2}{R}\sin\beta_1 \\ \sum F_y = F_N\cos\beta_1 + F_T\sin\alpha + F_r\cos\beta_1 + F_f\cos\beta_2 - G = \\ \quad F_N(\cos\beta_1 - \mu\cos\beta_2) + F_T\sin\alpha + m\left(\dfrac{v_e^2}{R}\cos\beta_1 - g\right)\end{cases} \tag{2}$$

其中
$$\beta_1 + \beta_2 = 90° \tag{3}$$

式中　F_r——种子所受离心力，N

β_1——离心力 F_r 与 y 轴之间的夹角，(°)

β_2——摩擦力 F_f 与 y 轴之间的夹角，(°)

v_e——种子牵连速度，m/s

R——弧面半径，mm

α、β_1 和 β_2 随着种子在引导弧面上的位置变化而改变，同时，受种子自身绝对速度 v_a 以及振动盘所给推力 F_T 等内外因素的综合影响，种子会产生弹跳等影响均匀落种的非理想运动状态。

当 $\sum F_x$ 和 $\sum F_y$ 均为 0 时，合外力不做功。此时，种子在引导弧面上作匀速圆周运动，可实现匀速下滑。种子脱离引导弧面后，将以 3 种运动轨迹进入滑槽。设定第一象限内的入射角为正，第二象限内的入射角为负。当种子与滑槽碰撞入射角为正时，种子发生向下的反弹。这有利于种子快速进入滑槽并向下运移，避免种群在振动盘尾部与滑槽之间产生拥堵。当入射角为零时，种子沿入射轨迹反弹，并与振动盘后续掉落的种子发生碰撞，导致种子流的初始均匀性以及下落速率降低。当种子与滑槽碰撞入射角为负时，种子发生向上的反弹。当种子回落时，会与后续进入滑槽的种子发生碰撞，阻碍种子均匀进入滑槽路径。综上所述，种子以正入射角进入滑槽并在滑槽保持直线滑移，更有利于保证种子均匀下落。

2.2　引导弧面设计

种子的初速度影响其脱离引导弧面后的运动轨迹[23]。对引导弧面上的种子进行动力学分析，如图 5 所示。种子在引导弧面上的绝对速度、相对速度以及牵连速度之间的关系式为

$$\begin{cases}v_a = v_e\cos(\alpha + \gamma_a) + v_r\cos(90° - \gamma_a - \beta_2) \\ v_e\sin(\alpha + \gamma_a) = v_r\sin(90° - \gamma_a - \beta_2)\end{cases} \tag{4}$$

其中
$$\beta_2 = 90° - \varphi \tag{5}$$

式中　v_r——种子的相对速度，m/s

γ_a——绝对速度 v_a 与 x 轴之间的夹角，(°)

φ——引导弧面圆心角，(°)

由式(2)、(4)、(5)可知，种子在引导弧面上的绝对速度 v_a 与引导弧面圆心角 φ 呈负相关。为使种子运动状态可控，应尽可能保证圆心角 φ 足够大。当 $\varphi > 90°$ 时，引导弧面的多余部分将失去引导作用。因此，选定引导弧面圆心角 φ 为 90°。

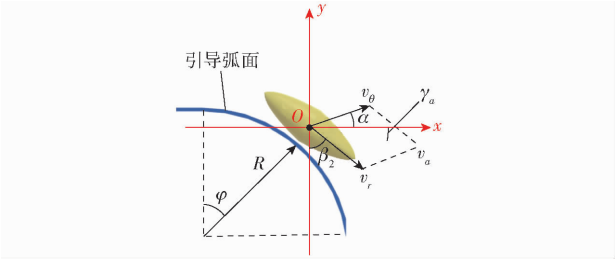

图 5　种子导向动力学分析

Fig. 5　Kinetic analysis of guided seeds

引导弧面半径 R 决定种子在滑槽上的入射点位。如图 6 所示，为防止种群产生拥堵架桥现象，当振动盘运动到离护种板最近时，引导弧面与滑槽之间的最短垂直距离 H_{min} 应大于种子最大长度 l_{max}；为保证弧面起到引导作用，防止种子产生无序转动，R 应大于种子最大长度 l_{max} 的 2 倍。因此，结合水稻亲本种子及关键部件的尺寸，选定引导弧面半径 R 的取值范围在 21.02 ~ 30.36 mm 之间，其最优取值通过后续仿真试验确定。

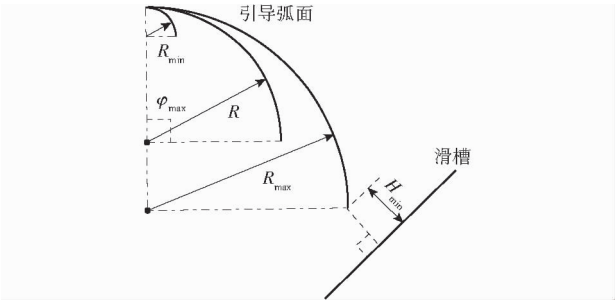

图 6　引导弧面结构参数示意图

Fig. 6　Guiding arc surface structure parameters

2.3　波浪形滑槽设计

波浪形滑槽是对种子起导向和约束作用的关键部件，主要由凸脊和凹槽结构组成。在滑槽的约束作用下，种子沿长轴方向下滑，在凹槽中存在侧躺(厚度与水平方向一致)和平躺(宽度与水平方向一致)两种状态，在凸脊上则存在斜躺(长度与水平方向呈一定夹角)和横躺(长度与水平方向一致)两种状态。当种子以平躺和侧躺状态下滑时，其受力状态相同。因此，以平躺姿态为例，对滑槽上的种子进行受力分析，如图 7 所示。种子在滑槽上的受力方程为

$$\begin{cases}\sum F_x = F_f\cos\gamma_1 - F_N\cos\gamma_2 \\ \sum F_y = F_f\sin\gamma_1 + F_N\sin\gamma_2 - G\end{cases} \tag{6}$$

其中
$$\gamma_1 + \gamma_2 = 90° \tag{7}$$

式中　γ_1——摩擦力 F_f 与 x 轴之间的夹角，(°)

γ_2——支持力 F_N 与 x 轴之间的夹角,(°)

因此,化简式(6)可得

$$\begin{cases}\sum F_x = F_N(\mu\cos\gamma_1 - \sin\gamma_1)\\ \sum F_y = F_N(\mu\sin\gamma_1 + \cos\gamma_1) - mg\end{cases} \tag{8}$$

在滑槽斜面平行方向存在关系式

$$\begin{cases}F_N - G\cos\theta = F_N - mg\cos\theta = 0\\ G\sin\theta - F_f = mg\sin\theta - \mu F_N = ma\end{cases} \tag{9}$$

式中 θ——滑槽安装倾斜角,(°)

化简式(9)可得落种加速度 a 为

$$a = g(\sin\theta - \mu\cos\theta) \tag{10}$$

由式(10)可知,种子在滑槽上作匀加速直线运动,其落种加速度 a 受滑槽安装倾斜角 θ 的影响。滑槽安装倾斜角 θ 应大于水稻亲本种子与滑槽之间的摩擦角 21.8°。根据前期试验,选定滑槽安装倾斜角 θ 为 45°,以确保种子在滑槽上具有良好的流动性。

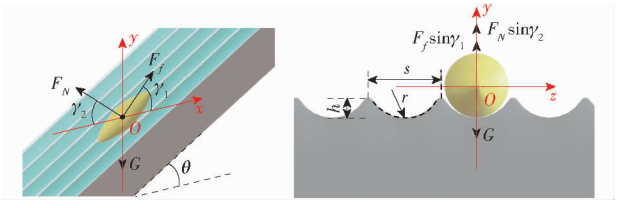

图 7 种子导向约束受力分析

Fig. 7 Force analysis of guiding constraint seeds

导向束种阶段种子能否在落种点位单粒均匀下落,取决于滑槽的各项结构参数。为防止滑槽中存在两粒种子,凹槽宽度 s 应大于种子最大宽度 w_{max},小于种子最小厚度 t_{min} 的 2 倍。同样地,凹槽深度 h 应大于种子最大宽度 w_{max} 的 50%,小于种子最大厚度 t_{max}。为使得凹槽更好地贴合种子,凹槽半径 r 应大于种子平均厚度 t_{ave},小于种子平均宽度 w_{ave}。各参数的约束条件为

$$\begin{cases}w_{max} < s < 2t_{min}\\ 0.5w_{max} < h < t_{max}\\ t_{ave} < r < w_{ave}\end{cases} \tag{11}$$

结合水稻亲本种子特征尺寸的测量结果与式(11),确定凹槽宽度 s、凹槽深度 h 和凹槽半径 r 的取值范围为 2.58 ~ 3.08 mm、1.29 ~ 2.24 mm 和 1.93 ~ 2.28 mm。各参数最优取值通过后续仿真试验确定。

3 仿真试验

3.1 仿真模型建立

3.1.1 导向束种装置模型

为减少仿真时间与计算量,将导向束种装置模型进行简化后导入到 EDEM 软件中,只保留与种子存在接触的振动盘、护种板、波浪形滑槽和稳流限位板,建立的导向束种装置仿真模型如图 8 所示。

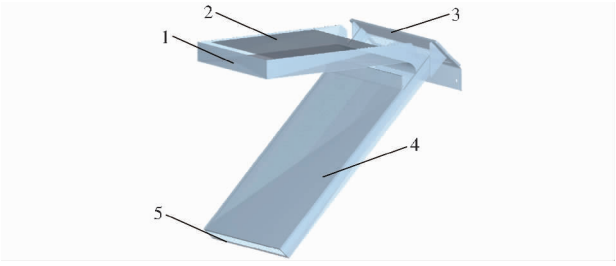

图 8 导向束种装置仿真模型

Fig. 8 Simulation model of seed guiding constraint device

1. 振动盘 2. 颗粒工厂 3. 护种板 4. 稳流限位板 5. 波浪形滑槽

3.1.2 水稻亲本种子离散元模型

本文选用黄华占水稻种子为研究对象,其属于籼稻类型,形状细长。对种子的三轴尺寸(长度、宽度、厚度)进行测量,结果表明种子的长度、宽度、厚度均符合正态分布,并且长度、宽度与厚度之间存在特定的函数关系。基于测量的水稻亲本种子外形尺寸,选取厚度作为主尺寸,其余特征尺寸通过与主尺寸所建立的函数关系计算得到。

3.1.3 仿真参数设定

振动盘和波浪形滑槽材料设置为不锈钢,护种板和稳流限位板材料设置为有机玻璃,结合前期试验及文献[24 - 25],设置仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
水稻种子泊松比	0.3
水稻种子剪切模量/Pa	1.82×10^8
水稻种子密度/(kg·m^{-3})	1 200
不锈钢泊松比	0.3
不锈钢剪切模量/Pa	7×10^{10}
不锈钢密度/(kg·m^{-3})	7 800
有机玻璃泊松比	0.35
有机玻璃剪切模量/Pa	1.3×10^9
有机玻璃密度/(kg·m^{-3})	1 180
水稻种子间恢复系数	0.3
水稻种子间静摩擦因数	0.56
水稻种子间动摩擦因数	0.15
水稻种子与不锈钢间恢复系数	0.5
水稻种子与不锈钢间静摩擦因数	0.4
水稻种子与不锈钢间动摩擦因数	0.02
水稻种子与有机玻璃间恢复系数	0.519
水稻种子与有机玻璃间静摩擦因数	0.252
水稻种子与有机玻璃间动摩擦因数	0.026

为保证所设定仿真参数的准确性,采用堆积角仿真与实际试验进行对比验证。结果表明,仿真堆积角为 31.56°,实际堆积角为 31.37°,二者的相对

误差为 0.61%，表明仿真参数设置与模型均可靠[26]。

根据电磁振动给料器的输送机理[27]，得到振动盘的运动方程

$$S = A\sin(\omega t + \theta_0) \tag{12}$$

其中

$$\omega = 2\pi f \tag{13}$$

式中　S——振动盘位移，mm

A——振幅，mm

ω——角速度，rad/s

t——时间，s

θ_0——振动相位角，(°)

f——振动频率，Hz

振动盘的振动方向角设置为 20°，其大小取决于板弹簧的安装倾角。为确保振动盘的仿真效果与实际振动条件保持一致，在 EDEM 软件中为振动盘添加正弦平移运动，频率设置为 50 Hz，振幅为 1.5 mm。

3.2　引导弧面对入种效果的影响仿真试验

3.2.1　试验设计与指标

以引导弧面半径 R 为试验因素，以平均入种轨迹偏移量 S_t 和平均脱离速度角 ξ 为试验指标，开展单因素试验。结合前文对引导弧面结构设计的理论分析并考虑加工实际，选定 R 的范围为 22 ~ 30 mm，以 2 mm 为试验梯度，开展 5 组试验，每组试验重复 3 次，取平均值作为试验结果。在 EDEM 软件后处理界面建立网格箱组传感器，提取 5 s 内种子颗粒在引导弧面和滑槽顶部的位置与速度变化数据。平均入种轨迹偏移量 S_t 和平均脱离速度角 ξ 计算式为

$$S_t = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - S_0)}{n} \tag{14}$$

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^{n}\arctan\left|\frac{v_x}{v_y}\right|}{n} \tag{15}$$

式中　S_i——x 轴方向第 i 个种子与原点的距离，mm

S_0——x 轴方向弧面切线与原点的距离，mm

v_x——x 轴方向种子颗粒速度，m/s

v_y——y 轴方向种子颗粒速度，m/s

n——被提取种子颗粒数量

3.2.2　试验结果与分析

单因素试验结果如图 9 所示。随着引导弧面半径的增大，平均入种轨迹偏移量逐渐减小。这是因为半径越大，曲率越平缓，种子受惯性力作用减少了提前脱离弧面的风险，其运动轨迹可以很好地被约束在弧面轮廓上，从而减少了轨迹偏移。此外，较大的半径使得种子的脱离点距离滑槽更近，种子在脱离引导弧面时受到振动盘的推动作用，从而具有较大的脱离初速度。较大的速度使得种子在 x 轴方向快速与滑槽接触，并发生能量传递，减弱了支撑其在 x 轴方向上发生轨迹偏移的动能。

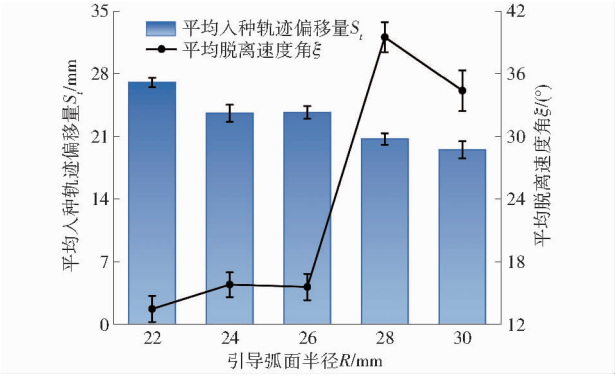

图 9　单因素试验结果

Fig. 9　Single factor test results

当引导弧面半径 $R \leqslant 26$ mm 时，种子的平均脱离速度角 ξ 较为稳定，表明引导弧面的导向作用较强。当种子较早地脱离引导弧面时，其具有足够的时间依靠重力加速度增大 y 轴方向的速度 v_y，从而减小与滑槽接触时的入射角 δ_1。当引导弧面半径 $R > 26$ mm 时，种子的平均脱离速度角 ξ 出现急剧增大的趋势，表明大部分种子是依靠惯性滑落，并未被有效引导。这是因为随着引导弧面半径 R 的增大，种子脱离引导弧面的位置随之下移。种子受到振动盘的推动导致脱离区域颗粒群发生混乱无序碰撞，脱离速度角出现较大的增幅。

综上所述，较大的引导弧面半径可有效提高种子与弧面的贴合性能，但半径过大会削弱其主动导向能力。考虑到种子的脱离速度角 ξ 对种子的入射角 δ_1 具有显著影响，并为了避免种子在滑槽上产生较大的冗余位移，选定引导弧面半径 $R = 26$ mm 作为最优结构参数，可实现良好的导向效果，保证滑槽顶部的入种稳定性。此时，平均入种轨迹偏移量 S_t 为 23.75 mm，平均脱离速度角 ξ 为 15.64°。

3.3　波浪形滑槽各结构参数对导向束种效果的交互作用

3.3.1　试验设计与指标

以凹槽宽度 s、凹槽深度 h 和凹槽半径 r 为试验因素，以落种量均匀性变异系数 C_1 和落种轨迹稳定性变异系数 C_2 为试验指标，开展三因素三水平 Box－Behnken(BBD)试验设计。结合前文理论分析，确定各试验因素和编码如表 2 所示，试验共 17 组，每组试验重复 3 次，取平均值作为试验指标值。

表 2 BBD 试验因素编码

Tab. 2 BBD test factors codes mm

编码	s	h	r
1	3.0	2.2	2.2
0	2.8	1.8	2.1
-1	2.6	1.4	2.0

在滑槽底部建立网格箱组传感器,包含 16 个网格箱,提取 5 s 内经过网格箱的颗粒数量信息。落种量均匀性变异系数 C_1 计算式为

$$\begin{cases} C_1 = \dfrac{\sigma_1}{\overline{N}} \times 100\% = \dfrac{\sqrt{\dfrac{\sum_{j=1}^{n_1}(N_j - \overline{N})^2}{n_1}}}{\overline{N}} \times 100\% \\ \overline{N} = \dfrac{\sum_{j=1}^{n_1} N_j}{n_1} \end{cases} \tag{16}$$

式中 σ_1——各网格箱落种数量标准差

$\overline{N}$——各网格箱平均落种数量

N_j——第 j 个网格箱的落种数量

n_1——网格箱数量

随机选取 100 个种子颗粒,提取其在滑槽顶部与底部 z 轴方向上的位置数据。落种轨迹稳定性变异系数 C_2 计算式为

$$\begin{cases} C_2 = \dfrac{\sigma_2}{\overline{\varepsilon}} \times 100\% = \dfrac{\sqrt{\dfrac{\sum_{k=1}^{n_2}(\varepsilon_k - \overline{\varepsilon})^2}{n_2}}}{\overline{\varepsilon}} \times 100\% \\ \overline{\varepsilon} = \dfrac{\sum_{k=1}^{n_2} |Z_{k1} - Z_{k2}|}{n_2} \end{cases} \tag{17}$$

式中 σ_2——落种轨迹偏移量标准差,mm

$\overline{\varepsilon}$——落种轨迹平均偏移量,mm

ε_k——第 k 个种子的落种轨迹偏移量,mm

Z_{k1}——第 k 个种子 z 轴方向的初始位置,mm

Z_{k2}——第 k 个种子 z 轴方向的落种位置,mm

n_2——种子颗粒数量

3.3.2 试验结果与方差分析

BBD 试验结果如表 3 所示(X_1、X_2、X_3 为因素编码值)。将试验结果导入到 Design-Expert 软件中进行显著性检验与方差分析,并建立各试验指标的回归模型。方差分析结果如表 4 所示。

落种量均匀性变异系数 C_1 回归模型极显著($P < 0.01$),失拟项不显著($P > 0.05$),表明模型拟合度较高。其中,X_1、X_2、X_3、X_1X_3、X_1^2 和 X_3^3 对模型影响极显著($P < 0.01$),X_2X_3 对模型影响显著($0.01 < P < 0.05$),其他项均不显著($P > 0.05$)。将不显著项剔除后,C_1 的二次回归方程为

$$C_1 = 7.89 - 0.75X_1 + 1.62X_2 + 0.75X_3 + 1.61X_1X_3 + 0.54X_2X_3 - 0.88X_1^2 + 1.28X_3^2 \tag{18}$$

落种轨迹稳定性变异系数 C_2 回归模型极显著($P < 0.01$),失拟项不显著($P > 0.05$),表明模型拟合度较高。其中,X_3 和 X_2X_3 对模型影响极显著($P < 0.01$),X_2、X_1X_3 和 X_3^3 对模型影响显著($0.01 < P < 0.05$),其他项均不显著($P > 0.05$)。将除 X_1 外的不显著项剔除后,C_2 的二次回归方程为

$$C_2 = 13.81 - 0.50X_1 - 1.78X_2 + 3.07X_3 + 1.93X_1X_3 + 4.54X_2X_3 + 1.85X_3^2 \tag{19}$$

表 3 BBD 试验设计与结果

Tab. 3 BBD test results

试验号	因素			C_1/%	C_2/%
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	0	5.81	17.98
2	1	-1	0	4.51	15.41
3	-1	1	0	9.65	14.52
4	1	1	0	6.87	13.83
5	-1	0	-1	9.71	15.93
6	1	0	-1	5.53	11.71
7	-1	0	1	7.83	16.28
8	1	0	1	10.09	19.79
9	0	-1	-1	6.88	19.81
10	0	1	-1	9.18	6.13
11	0	-1	1	7.47	18.81
12	0	1	1	11.93	23.29
13	0	0	0	7.62	13.01
14	0	0	0	7.96	15.83
15	0	0	0	8.38	12.86
16	0	0	0	7.76	13.20
17	0	0	0	7.74	14.13

表 4 试验结果方差分析

Tab. 4 ANOVA for test results

方差来源	C_1		C_2	
	F	P	F	P
模型	39.17	<0.01 **	10.59	<0.01 **
X_1	30.46	<0.01 **	0.83	0.39
X_2	142.12	<0.01 **	10.73	0.02 *
X_3	30.66	<0.01 **	31.98	<0.01 **
X_1X_2	3.71	0.10	0.37	0.56
X_1X_3	70.18	<0.01 **	6.32	0.04 *
X_2X_3	7.90	0.03 *	34.89	<0.01 **
X_1^2	22.00	<0.01 **	0.13	0.73
X_2^2	2.63	0.15	3.27	0.11
X_3^2	46.44	<0.01 **	6.09	0.04 *
失拟项	2.53	0.20	2.28	0.22

注:** 表示影响极显著($P \leqslant 0.01$);* 表示影响显著($0.01 < P \leqslant 0.05$)。

3.3.3　响应面分析

由图 10a 可知，当凹槽深度一定，凹槽宽度较小时，随着凹槽半径的增大，落种量均匀性变异系数先减小后略微增大；当凹槽宽度较大时，落种量均匀性变异系数随着凹槽半径的增大而急剧增大。由图 10b 可知，当凹槽宽度一定时，若凹槽深度不变，随着凹槽半径的增大，落种量均匀性变异系数呈现出先减小后增大的趋势；若凹槽半径不变，落种量均匀性变异系数随着凹槽深度的增大而增大。由图 10c 可知，当凹槽深度一定，凹槽宽度较小时，随着凹槽半径的增大，落种轨迹稳定性变异系数基本不变；当凹槽宽度较大时，落种轨迹稳定性变异系数随着凹槽半径的增大而增大。由图 10d 可知，当凹槽宽度一定，凹槽深度较小时，随着凹槽半径的增大，落种轨迹稳定性变异系数随之减小；当凹槽深度较大时，落种轨迹稳定性变异系数随着凹槽半径的增大而急剧增大。整体上，随着凹槽深度和凹槽半径的增大，落种轨迹稳定性变异系数呈现先减小后增大的趋势。

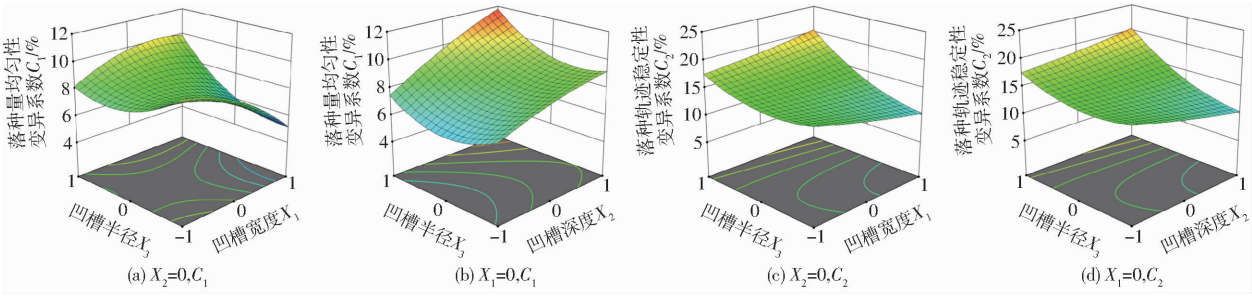

图 10　各试验因素交互作用对试验指标影响的响应面

Fig. 10　Response surfaces of effects of interactions among various test factors on test indicators

3.3.4　参数优化与验证

为得到波浪形滑槽的最优结构参数组合，运用 Design-Expert 软件对试验指标进行多目标优化求解，其约束条件和目标函数为

$$\begin{cases} \min C_1(X_1,X_2,X_3) \\ \min C_2(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{20}$$

求解可得，波浪形滑槽在凹槽宽度为 3.0 mm、凹槽深度为 1.5 mm、凹槽半径为 2.0 mm 的条件下，落种均匀性最优。在最优参数组合条件下进行验证试验，结果表明，波浪形滑槽的落种量均匀性变异系数 C_1 为 4.83%，落种轨迹稳定性变异系数 C_2 为 14.33%。

4　性能验证试验

4.1　试验设计

4.1.1　试验条件

为验证仿真优化结果的准确性，根据最优结构参数对导向束种装置进行加工并安装于亲本种子精选机上，开展性能验证试验。试验用种为经过尺寸分级(1.8～2.1 mm)的水稻亲本种子，试验仪器与设备包括亲本种子精选机、缓存箱、数粒仪、秒表等，试验场景如图 11 所示。

4.1.2　试验方法

为验证导向束种装置的作业性能，并与传统装置进行对比，共开展 5 次重复试验，取平均值作为试验指标值。为保证种子流的连续性，设定进种量为 0.1 kg。通过精选机和人工多次分选，确定良种与劣种所占比例，并在每组试验结束后统计各通道落下的种子数量、被识别和剔除的良种与劣种数量，以便于计算各试验指标。

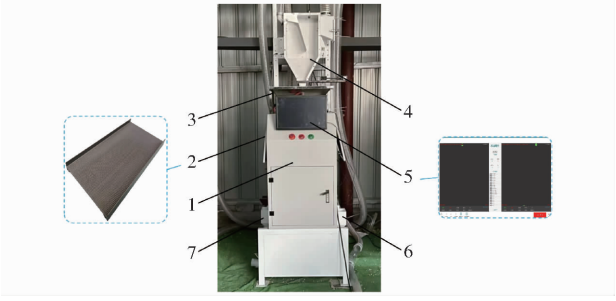

图 11　性能验证试验场景

Fig. 11　Performance verification test site

1. 亲本种子精选机　2. 导向束种装置　3. 进种装置　4. 缓存箱　5. 显示屏　6. 良种出口　7. 劣种出口

根据水稻亲本种子精选要求并参考 GB/T 46296—2025，选取落种量均匀性变异系数 C_1、识别率 Y_1、剔除率 Y_2 和带出比 η 为试验指标。其中，带出比为被剔除种子中良种与劣种的比值。识别率 Y_1、剔除率 Y_2 和带出比 η 计算式为

$$Y_1 = \frac{n_3}{n_0} \times 100\% \tag{21}$$

$$Y_2 = \frac{n_4}{n_0} \times 100\% \tag{22}$$

$$\eta = \frac{n_5}{n_4} \tag{23}$$

式中 n_0——待检种子中劣种总数量

n_3——被识别的劣种数量

n_4——被剔除的劣种数量

n_5——被剔除的良种数量

4.2 试验结果与分析

试验结果表明,安装有导向束种装置的亲本种子精选机落种量均匀性变异系数为 4.97%、带出比为 0.19,较传统装置分别减少了 8.07 个百分点和 0.07;识别率为 97.81%、剔除率为 95.25%,较传统装置分别增加了 4.13、4.49 个百分点。其主要原因为种子在平面滑槽上容易弹跳和滚动,产生不可预测的运动轨迹;而波浪形滑槽可以对种子实现良好的约束,稳定种子的下落姿态。导向束种装置的引导和约束作用可显著提高种子流均匀性,其作业性能优于传统装置。

4.3 多品种适应性分析

为进一步验证导向束种装置对不同品种亲本种子的适应性,另外选取 4 个品种的水稻种子,开展性能试验。以落种量均匀性变异系数、识别率、剔除率和带出比为试验指标,试验结果如表 5 所示。对于不同品种的种子,落种量均匀性变异系数和带出比差异不大,指标值存在较大的重叠范围;识别率均超过 95%,剔除率均能达到 92% 以上。这表明导向束种装置对不同品种的水稻种子适应性较好。

表 5 不同品种水稻种子性能试验结果

Tab. 5 Performance test results of different varieties of rice seeds

品种	C_1/%	Y_1/%	Y_2/%	η
黄华占	4.97	97.81	95.25	0.19
美香占 2 号	5.51	95.73	93.11	0.21
桂农占	5.85	95.69	92.92	0.21
五广丝苗	6.19	95.34	92.38	0.23
粤农丝苗	5.16	97.33	94.67	0.20

5 结论

(1)提出了对种子进行路径引导和约种成束的技术思路,设计了一种新型导向束种装置。完成了种子运动轨迹的规划,确定了导向束种装置的关键结构参数和取值范围。

(2)单因素试验结果表明,当引导弧面半径为 26 mm 时,平均入种轨迹偏移量为 23.75 mm,平均脱离速度角为 15.64°,具有良好的导向效果。多因素试验结果表明,当凹槽宽度 s 为 3.0 mm、凹槽深度 h 为 1.5 mm、凹槽半径 r 为 2.0 mm 时,落种均匀性达到最优;经验证得,最优参数组合条件下落种量均匀性变异系数和落种轨迹稳定性变异系数分别为 4.83% 和 14.33%。

(3)性能验证与对比试验结果表明,增设导向束种装置的亲本种子精选机落种量均匀性变异系数为 4.97%、带出比为 0.19,较传统装置分别减少了 8.07 个百分点和 0.07;识别率为 97.81%、剔除率为 95.25%,较传统装置分别增加了 4.13、4.49 个百分点,各项指标均优于传统装置。带有波浪形滑槽的导向束种装置种子流均匀性优于传统平面滑槽。采用导向束种装置可显著提高亲本种子精选机的作业性能。

参 考 文 献

[1] 朱明, 陈海军, 李永磊. 中国种业机械化现状调研与发展分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 1 – 7.
ZHU Ming, CHEN Haijun, LI Yonglei. Investigation and development analysis of seed industry mechanization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 1 – 7. (in Chinese)

[2] 毕于彬, 宋庆斌, 赵鹏飞, 等. 玉米亲本种子变幅振动式分级装置研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 23 – 32.
BI Yubin, SONG Qingbin, ZHAO Pengfei, et al. Development of the variable amplitude vibration grading device for maize parental seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(12): 23 – 32. (in Chinese)

[3] ZHAO Z, JIN M, QIN F, et al. A novel neural network approach to modeling particles distribution on vibrating screen[J]. Powder Technology, 2021, 382: 254 – 261.

[4] 侯俊铭, 任兆坦, 朱红杰. 双层倾斜振动风筛式蓖麻清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 39 – 51.
HOU Junming, REN Zhaotan, ZHU Hongjie. Design and test of double-layer inclined vibrating air-screen castor cleaning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 39 – 51. (in Chinese)

[5] 冯鑫, 王立军, 于琨蒙, 等. 玉米籽粒清选波浪筛机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 142 – 154.
FENG Xin, WANG Lijun, YU Kunmeng, et al. Design and experiment of mechanism of wave screen for maize grain cleaning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 142 – 154. (in Chinese)

[6] ZHAO G, QUAN L, LI H, et al. Real-time recognition system of soybean seed full-surface defects based on deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106230.

[7] ZHANG X, XUAN C, HOU Z. Recognition model for coated red clover seeds using YOLOv5s optimized with an attention module[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16: 207 – 214.

[8] 宋鹏, 张晗, 王成, 等. 玉米籽粒考种信息获取装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 19 – 25.
SONG Peng, ZHANG Han, WANG Cheng, et al. Design and experiment of maize kernel traits acquisition device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 19 – 25. (in Chinese)

[9] 孟繁佳，罗石，孙红，等. 玉米种子实时检测分选装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(3)：153－159.
MENG Fanjia，LUO Shi，SUN Hong，et al. Design and experiment of real-time detection and sorting device for maize seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(3)：153－159.（in Chinese）
[10] 闫彬，杨福增，郭文川. 基于机器视觉技术检测裂纹玉米种子[J]. 农机化研究，2020，42(5)：181－185.
YAN Bin，YANG Fuzeng，GUO Wenchuan. Detection of maize seeds with cracks based on machine vision technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2020，42(5)：181－185.（in Chinese）
[11] TU K，WEN S，CHENG Y，et al. A non-destructive and highly efficient model for detecting the genuineness of maize variety JINGKE 968 using machine vision combined with deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2021，182：106002.
[12] 赵志衡，宋欢，朱江波，等. 基于卷积神经网络的花生籽粒完整性识别算法及应用[J]. 农业工程学报，2018，34(21)：195－201.
ZHAO Zhiheng，SONG Huan，ZHU Jiangbo，et al. Identification algorithm and application of peanut kernel integrity based on convolution neural network[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(21)：195－201.（in Chinese）
[13] 黄敏，夏超，朱启兵，等. 融合高光谱图像技术与 MS－3DCNN 的小麦种子品种识别模型[J]. 农业工程学报，2021，37(18)：153－160.
HUANG Min，XIA Chao，ZHU Qibing，et al. Recognizing wheat seed varieties using hyperspectral imaging technology combined with multi-scale 3D convolution neural network[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(18)：153－160.（in Chinese）
[14] 宋鹏，张俊雄，荀一，等. 玉米种子自动精选系统开发[J]. 农业工程学报，2010，26(9)：124－127.
SONG Peng，ZHANG Junxiong，XUN Yi，et al. Developement of automatic inspection system of corn seeds[J]. Transactions of the CSAE，2010，26(9)：124－127.（in Chinese）
[15] 余淑华，刘艳丽，王世璞，等. 基于 FPGA 的脱绒棉种色选机实现[J]. 农业机械学报，2015，46(8)：20－26.
YU Shuhua，LIU Yanli，WANG Shipu，et al. Implementation of delinted cottonseeds color sorter based on FPGA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(8)：20－26.（in Chinese）
[16] 闫宁. 基于机器视觉的小麦种粒品种检测分选装置研制及方法研究[D]. 太原：中北大学，2022.
YAN Ning. Development and method research of wheat seed and grain variety detection and sorting device based on machine vision[D]. Taiyuan：North University of China，2022.（in Chinese）
[17] 张晗，闫宁，吴旭东，等. 在线式玉米单粒种子检测分选装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(6)：159－166.
ZHANG Han，YAN Ning，WU Xudong，et al. Design and experiment of online maize single seed detection and sorting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(6)：159－166.（in Chinese）
[18] ZHAO Z，WU Y，YIN J，et al. Monitoring method of rice seeds mass in vibrating tray for vacuum-panel precision seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2015，114：25－31.
[19] ZHAO Z，JIN M，TIAN C，et al. Prediction of seed distribution in rectangular vibrating tray using grey model and artificial neural network[J]. Biosystems Engineering，2018，175：194－205.
[20] ZHAO Z，ZHANG Y，QIN F，et al. Kinetic model of vibration screening for granular materials based on biological neural network[J]. Particuology，2024，88：98－106.
[21] 闫泽民. 玉米色选机分选效果主要影响因素的研究[D]. 郑州：河南工业大学，2018.
YAN Zemin. Research on the main influencing factors of sorting effect of corn color sorter[D]. Zhengzhou：Henan University of Technology，2018.（in Chinese）
[22] 董建鑫，高筱钧，张仕林，等. 玉米姿控驱导式排种器导向投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(10)：25－34.
DONG Jianxin，GAO Xiaojun，ZHANG Shilin，et al. Design and test of guiding seed throwing mechanism for maize posture control and driving metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(10)：25－34.（in Chinese）
[23] 宋庆斌，毕于彬，赵鹏飞，等. 玉米小区播种机阻断型气吸式排种器设计与试验[J]. 农业工程学报，2025，41(4)：1－9.
SONG Qingbin，BI Yubin，ZHAO Pengfei，et al. Design and test of the blocking type air-suction seed metering device for maize plot seeder[J]. Transactions of the CSAE，2025，41(4)：1－9.（in Chinese）
[24] 刘彩玲，王亚丽，宋建农，等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报，2016，32(15)：294－300.
LIU Cailing，WANG Yali，SONG Jiannong，et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(15)：294－300.（in Chinese）
[25] 张荣芳，焦伟，周纪磊，等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊1)：227－235.
ZHANG Rongfang，JIAO Wei，ZHOU Jilei，et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp.1)：227－235.（in Chinese）
[26] 张庆，孙立皓，樊向东，等. 苜蓿种荚分离清选离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(11)：156－164.
ZHANG Qing，SUN Lihao，FAN Xiangdong，et al. Calibration and experiment of discrete element model parameters for alfalfa seed pod separation and cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(11)：156－164.（in Chinese）
[27] 顾平灿. 电磁振动给料器的建模与参数选择[D]. 舟山：浙江海洋学院，2013.
GU Pingcan. The electromagnetic vibratory feeder for modeling and parameter selection[D]. Zhoushan：Zhejiang Ocean University，2013.（in Chinese）