doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.015

双复合振动排种式种子检测与分选装置设计与试验

罗　斌[1,2]　马乐意[1,2]　张　晗[2]　周亚男[2]　康　凯[2]　谢子文[2]

(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;
2.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097)

摘要:为解决分量型种质检测与分选设备缺乏、检测效率低的问题,设计了双复合振动排种式种子检测与分选装置,通过双复合振动对种子进行平铺,分选部件根据检测结果选出优质种子。该装置由排种部件、检测部件、分选部件等关键零部件组成,对关键零部件进行结构设计和理论分析,设计出较优零部件。以玉米种子为试验对象,单因素试验确定下料盘和均铺盘的电压、振动频率范围,以粒距合格率、籽粒贴合率和籽粒残留率为试验指标,开展四因素三水平试验,建立响应面数学回归模型,分析各因素及交互作用对装置作业的影响。结果表明,下料盘电压为 60 V、振动频率为 46.0 Hz,均铺盘电压为 55 V、振动频率为 51.6 Hz 时,装置的排种效果最优。以最优参数进行试验验证,得到粒距合格率为 90.5%、籽粒贴合率为 2.9%、籽粒残留率为 2.3%,装置分选速度可达 1 000 粒/min,满足种质资源精选入库需求。

关键词:种子;双复合振动;检测与分选装置;粒距

中图分类号:S229　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)07-0165-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Seed Detection and Sorting Device with Double Compound Vibration Seed Metering System

LUO Bin[1,2]　MA Leyi[1,2]　ZHANG Han[2]　ZHOU Ya'nan[2]　KANG Kai[2]　XIE Ziwen[2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Intelligent Equipment Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Aiming to solve the problems of lack of detection and sorting equipment for component-type germplasm and low detection efficiency, a seed detection and sorting device with double composite vibration seed metering was designed. The seeds were flattened through double composite vibration, and the sorting component selected high-quality seeds according to the detection results. The device consisted of key components such as the seed metering component, detection component, and sorting component. Structural design and theoretical analysis were carried out on the key components to design better components. Taking corn seeds as the test object, the voltage and vibration frequency ranges of the feeding tray and the leveling tray were determined through single-factor tests. With the qualified rate of seed spacing, seed fitting rate, and seed residual rate as the test indicators, a four-factor and three-level test was carried out, and a response surface mathematical regression model was established to analyze the influence of each factor and their interactions on the operation of the device. The results showed that when the voltage of the feeding tray was 60 V and the vibration frequency was 46.0 Hz, the voltage of the leveling tray was 55 V and the vibration frequency was 51.6 Hz, the seed metering effect of the device was optimal. The test verification with the optimal parameters showed that the qualified rate of seed spacing was 90.5%, the seed fitting rate was 2.9%, and the seed residual rate was 2.3%. The sorting speed of the device can reach 1 000 seeds/min, which met the requirements for the selection and storage of germplasm resources.

Key words: seed; double composite vibration; detection and sorting device; particle spacing

收稿日期:2025-09-16　修回日期:2025-11-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFD1200104)和北京市农林科学院改革与发展项目(GGFZ20250111)

作者简介:罗斌(1981—),男,副研究员,博士,主要从事农业智能装备研究,E-mail:luob@nercita.org.cn

0 引言

农业种质库建设是一项专业性很强的农业工程,种质库保存的农业生物资源是育种的物质基础,也是国家宝贵的战略资源[1]。精选级别种子入库可为农作物品种选育与试验、制繁种、种子加工等起重要作用,是种业现代化的重要基础和前提[2-3],可有效增强种业安全,提高种子品质[4-6]。

我国种业智能收获和智能播种技术发展迅速,但在优质种子精选方面依然面临重要技术挑战[7-9]。传统种子分选主要依靠肉眼与工具相配合,效率低下,难以有效分离劣质籽粒[10]。因此在收获后精选出优质种子可有效使种质资源入库,进而提高作物的品质和产量[11-13]。

近年来,随着自动化技术的迅猛发展,种子分选装置的研发和推广取得较大进展[14-22]。孟繁佳等[23]设计了一种基于 HSV 颜色空间划分的玉米种子实时检测分选设备,此设备有效对霉变玉米种子实时检测和分选,速度最高可达 680 粒/min。封玉博等[24]基于机器视觉技术设计一种智能种子分选装置,以下斜抛水平距离和传送带传输速度为寻优条件进行试验,通过气吹式执行机构实现种子分选。张晗等[25]设计了一款在线式单粒种子检测分选装置,通过振动对种子进行平铺,装置分选速度大于 300 粒/min。PEARSON[26]开发了一款基于图像的玉米种子分离设备,将彩色图像传感器与 FPGA 控制器相结合,分选籽粒速度可达 800 粒/min。上述玉米种子分选装置对本研究装置的设计提供一定参考,虽然可分选劣质籽粒,但存在效率较慢、籽粒贴合较多、脱轨掉落等现象,对种质资源精选入库的应用存在不足。

针对上述问题,设计一款双复合振动排种式种子检测与分选装置。装置的双复合振动排种结合面阵排列,使种子逐粒散落于传送带表面,为高速工业相机和分选部件提供图像采集与分选条件。借助 EDEM 耦合仿真分析种子在装置上的运动效果,对装置的关键零部件进行受力分析和运动分析,设计出较优的零部件结构。借助响应面试验分析软件,确定装置作业的较优参数组合,并进行试验验证,实现装置的高速检测与分选性能。

1 装置整机结构与工作原理

1.1 整机结构

种子检测与分选装置由排种部件、检测系统、分选系统和控制系统组成,装置整机结构如图 1 所示,主要技术参数如表 1 所示。排种部件由零件 1 ~ 4 组成,通过双复合振动使种子逐粒散落于传送带;检测系统包括图像采集部件,采集传送带表面的种子,通过模型算法识别并定位种子;分选系统包括分选部件,根据模型识别的结果,将劣质籽粒(破损、霉变、发芽)气吹至相应的收料盒内;控制系统通过调整振动控制器、传送带和高频二通阀的开合,使装置有效分出劣质籽粒。

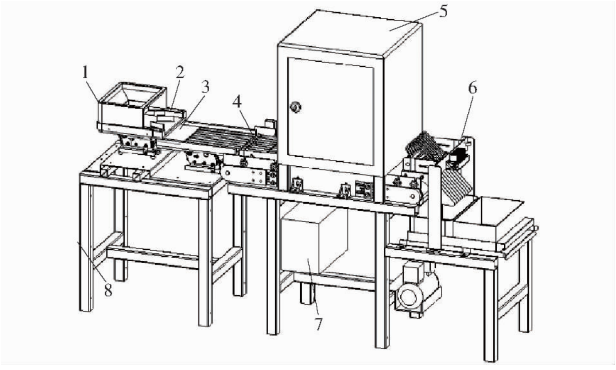


图 1 种子检测与分选装置结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of single-seed detection and sorting device

1. 进料漏斗 2. 下料盘 3. 均铺盘 4. 传送带 5. 图像采集部件 6. 分选部件 7. 控制系统 8. 机架

表 1 装置主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of device

整机参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 647×415×1 122
传送带速度 v_0/(cm·s^{-1})	10
传送带输送轴电压/V	24
工作气压/MPa	0.25

1.2 工作原理

种子检测与分选装置分为振动排种、图像采集、种子分选 3 部分。振动排种:投入进料漏斗的种子在振动器带动下向前运动,在下料盘和均铺盘配合下籽粒自动分离。图像采集:传送带将种子输送至检测暗箱,暗箱与 LED 灯管为工业相机拍摄提供稳定的采集环境,方便模型算法将优质与劣质的种子进行识别与定位。种子分选:对合格粒距的籽粒进行分选,贴合的籽粒不做处理,未贴合但不合格的籽粒对优先经过分选的籽粒进行分选处理,后者吹入不合格料盒。

2 关键部件设计

2.1 双复合振动排种部件设计

双复合振动排种部件主体由进料漏斗、弹簧垫圈、振动器、下料盘、均铺盘和传送带组成,结构如图 2 所示。下料盘和均铺盘由 3D 打印获得,材料选用光敏树脂,通过两级复合振动使种子逐粒散落

于传送带表面，下料盘表面设两挡板，种子在振动过程中实现有效分离；均铺盘内设 9 道凹槽，由振动器带动种子逐粒平铺于传送带表面，为种子检测与分选提供条件。

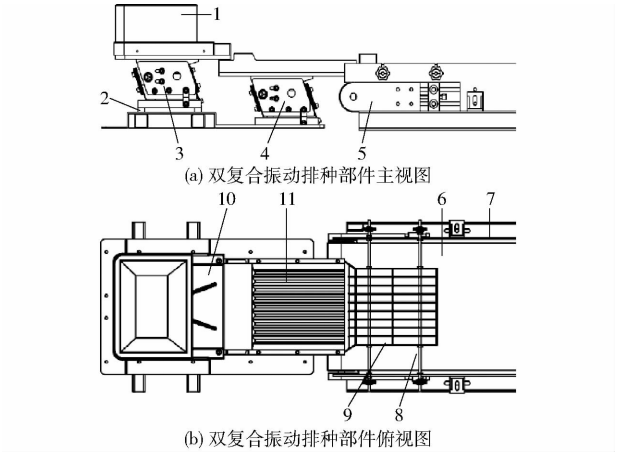


图 2　双复合振动排种部件结构示意图

Fig. 2　Schematics of structure of seed metering component

1. 进料漏斗　2. 弹簧垫圈　3、4. 振动器　5. 固定板　6. 传送带　7. 挡板　8. 螺杆　9. 隔离板　10. 下料盘　11. 均铺盘

2.1.1　下料盘设计

落入下料盘的种子存在静止、滑移、碰撞等多种运动状态。为将盘中种子有效分离，可在下料盘内设两挡板，长度为L_4 = 61.0 mm、厚度为 3.0 mm，位置为 $L_1 = L_2 = L_3$ = 61.0 mm，挡板之间的夹角为 α = 40°，其结构如图 3a 所示。在激振力 F 的作用下将种子分于盘口，盘面与底面倾角设为 β = 2°，可较快地向前运动。

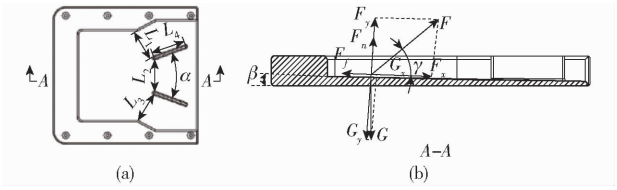


图 3　下料盘结构与受力分析图

Fig. 3　Structural and force analysis diagram of blanking tray

振动器产生的振动力称为激振力。本研究种子所受的激振力由送料控制器控制振动器的电压和频率来实现，振动器分别装在下料盘和均铺盘正下方，调整两振动器的电压和振动频率使种子向前运动。振动器输入电压范围为 0 ~ 260 V，频率范围为 25 ~ 400 Hz，种子在下料盘中受到重力 G、支持力 F_n、激振力 F 和盘面摩擦力 F_f 的综合作用，受力分析如图 3b 所示。其中振动器产生的激振力计算式为

$$F = ma_1 = m\omega^2\cos(\omega t + \theta_0) \tag{1}$$

式中　m——下料盘内种子质量，g

a_1——种子在激振力方向的加速度，m/s^2

ω——振动角速度，rad/s

t——振动器启动的时间，s

θ_0——初始相位角，(°)

通过振动强度 K 表述种子在下料盘和均铺盘上的振动强度，计算式为

$$K = \frac{A\omega^2}{g} \tag{2}$$

式中　A——下料盘的振幅，mm

g——重力加速度，取 9.8 m/s^2

通过抛掷指数 K_v 表述下料盘的运动状态，计算式为

$$K_v = \frac{A\omega^2\sin\gamma}{g\cos\beta} = K\frac{\sin\gamma}{\cos\beta} \tag{3}$$

式中　γ——振动方向角(激振力与盘面夹角)，(°)

种子在盘面的受力平衡状态 y 方程为

$$\begin{cases} G_y - F_y - F_n = mg\cos\beta - ma_1\sin\gamma - F_n = 0 \\ X_1 = F_x + G_x - F_f = F\cos\gamma + mg\sin\beta - F_f \end{cases} \tag{4}$$

式中　G_y——种子重力的 y 轴分力

F_y——激振力 y 轴分力

X_1——种子与平行盘面的受力

F_x——激振力 x 轴分力

G_x——种子重力的 x 轴分力

当种子在激振力的作用下跳动时，在振起的一瞬间盘对种子的支持力 F_n 为 0。由公式(3)、(4)可知

$$\begin{cases} mg\cos\beta = ma_1\sin\gamma = m\omega^2\cos(\omega t + \theta_0)\sin\gamma \\ \dfrac{a_1\sin\gamma}{g\cos\beta} = 1 \\ K_v\cos(\omega t + \theta_0) = 1 \end{cases} \tag{5}$$

因 $0 \leqslant \cos(\omega t + \theta_0) \leqslant 1$，当 $K_v > 1$ 时，盘内种子产生抛掷现象，不满足需求；当 $K_v \leqslant 1$ 时，盘内的种子向前移动，满足需求。

由公式(4)可知，当 $X_1 > 0$ 时，种子可以在激振力、重力和摩擦力的作用下散落至均铺盘。此时，种子所受的摩擦力 $F_f = \mu_1 mg\cos\beta$，式中 μ_1 表示种子在下料盘中的摩擦因数；当 $X_1 \leqslant 0$ 时，种子在下料盘内处于静止状态，难以实现种子的检测条件。

2.1.2　均铺盘设计

均铺盘表面设计 9 道凹槽，将种子分为 9 个通道；两边增设耳板，防止种子运动过程中发生掉粒现象，其结构如图 4 所示。当种子落于均铺盘后，在激振力的作用下种子逐粒落至传送带。通道内的种子受到重力 G、摩擦力 F_{2f}、支持力 F_{2n} 以及激振力 X_4，当激振力 X_4 足够大时，与摩擦力 X_{4f} 的作用下向前运动，种子受力分析如图 4b 所示。为使种子能够向前运动，种子于均铺盘的盘面水平顶端压力和合力 X_2，计算公式为

$$\begin{cases} G - F_{2y} - F_{2n} = m_1 g - F_2 \sin\delta - F_{2n} = 0 \\ X_2 = F_{2x} - F_{2f} = F_2 \cos\delta - F_{2f} \end{cases} \tag{6}$$

式中 m_1——单粒种子质量,g

δ——激振力与盘面之间夹角

F_{2x}——盘面对种子支撑力

F_{2y}——种子与盘面间的摩擦力

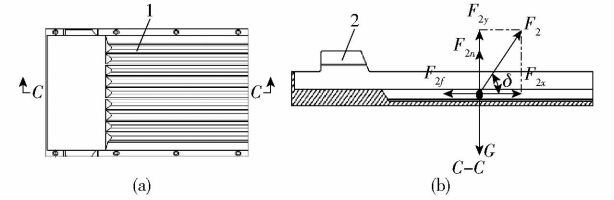


图 4 均铺盘结构设计与受力分析图

Fig. 4 Structural design and stress analysis diagram of uniform paving tray

1. 凹槽 2. 耳板

当 $X_2 > 0$ 时,种子在激振力和摩擦力的作用下落于传送带,此时,种子所受的摩擦力 $F_f = \mu_2 m_1 g$,式中 μ_2 为均铺盘的摩擦因数。由于下料盘和均铺盘的材料和表面精度相同,故 $\mu_1 = \mu_2$。当 $X_2 \leqslant 0$ 时,种子在均铺盘的振动下难以向前运动。

种子在两盘内发生向前运动的现象是难以具体表述的,因为盘面对种子的支持力 F_n、不同大小的种子质量和随着振动不断变化的激振力大小和方向均影响着种子的受力。但在试验过程中,调整后的种子在排种结构的作用下,可发生满足检测与分选需求的运动现象。

2.1.3 仿真方法

为更直观体现排种部件的上料效果,本研究设计出盘面无挡板、挡板均分盘口、挡板与盘边距离平行且相等 3 种不同类别的下料盘,结构如图 5 所示。为考虑种子与下料盘、均铺盘之间的交互作用,利用离散元仿真软件 EDEM 2024 耦合模拟分析种子在两盘的运动轨迹,对比试验现象,选出较优结构设计。

装置选用下料盘、均铺盘、隔离板、传送带 4 部分为主体试验对象,利用 Solidworks 为玉米种子和装置进行建模,模型图以 step 格式导出。通过 Rendering Options 模块导入玉米颗粒模板,Import Geometry 模块导入装置模型,仿真模型如图 6 所示。利用半径 1.18 mm 的球体填充玉米颗粒模板,其本

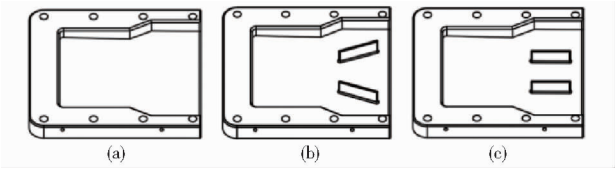


图 5 下料盘挡板结构图

Fig. 5 Structural diagrams of baffle of blanking tray

征参数参照文献[27 – 30],种子和排种部件的耦合参数如表 2 所示。

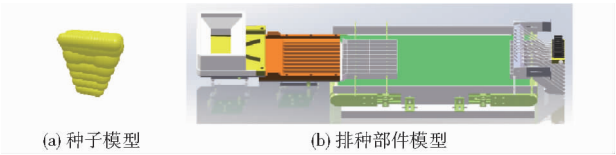


图 6 仿真模型

Fig. 6 Simulation model

表 2 耦合仿真模型参数设置

Tab. 2 Parameter settings of coupled simulation model

项目	参数	数值
种子颗粒	泊松比	0.40
	剪切模量/GPa	0.138
	密度/(kg·m^{-3})	1 197
下料盘	泊松比	0.35
	剪切模量/GPa	1.09
	密度/(kg·m^{-3})	1 330
种子颗粒-种子颗粒	碰撞恢复系数	0.18
	静摩擦因数	0.03
	动摩擦因数	0.01
种子颗粒-下料盘	碰撞恢复系数	0.71
	静摩擦因数	0.46
	动摩擦因数	0.09

将图 5 所示的 3 类下料盘结构依次导入 EDEM 耦合仿真软件,下料盘振幅设为 1 mm、振动频率为 46.0 Hz,均铺盘振幅为 1 mm、振动频率为 51.6 Hz,模拟种子在下料盘的运动状态。设置仿真固定时间步长为 1×10^{-6} s,网格尺寸为最小颗粒半径的 2.5 倍,每 0.001 s 保存一次数据[31]。

2.1.4 仿真运动分析

仿真排种部件运动效果如图 7 所示。图 7a 为种子在无挡板的下料盘中运动效果,在振动下成堆落至均铺盘,难以有效分离;图 7b 为种子在挡板均分下料盘中的运动效果,在挡板的作用下籽粒与籽

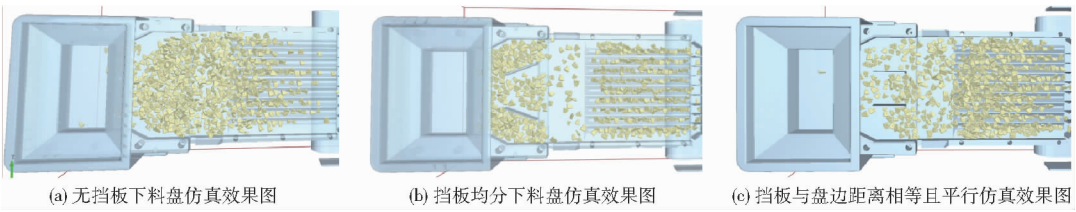


图 7 种子在下料盘中运动仿真效果图

Fig. 7 Simulation effect diagrams of seed movement in feeding tray

粒之间有效分离；图 7c 为种子在挡板与盘边距离平行且相等的下料盘中运动效果，在挡板的作用下落至均铺盘；图中种子分离效果与图 7b 相比明显不足。

综上所述，挡板均分下料盘盘口可有效分离种子，装置的排种效果较好。

2.2　检测部件设计

检测部件由暗箱、RGB 工业相机、LED 灯管以及灯罩组成，结构如图 8 所示。暗箱形成一个密闭环境，避免外界光源的干扰；相机选用 CMOS 高速工业数字相机，图像分辨率为 2 448 像素 ×2 048 像素，调整相机焦距与传送带距离（36.0 cm）得到清晰的图像，光源选用 2 条 LED 白炽光；传送带选用黑色，为图像采集提供单一颜色背景。采集的图像由模型识别优质与劣质种子，并对劣质种子定位，通过分选部件进行处理。

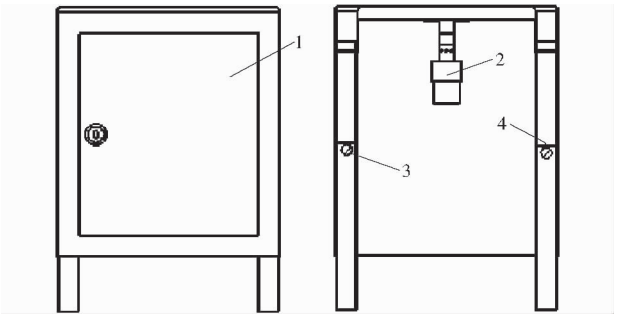


图 8　检测部件结构示意图

Fig. 8　Schematic of structure of detection component

1. 暗箱　2. RGB 工业相机　3. LED 灯管　4. 灯罩

2.3　分选部件设计

分选部件由气管、空气压缩机、高频二通阀、分选板、收料盒和机架组成，结构如图 9a 所示。

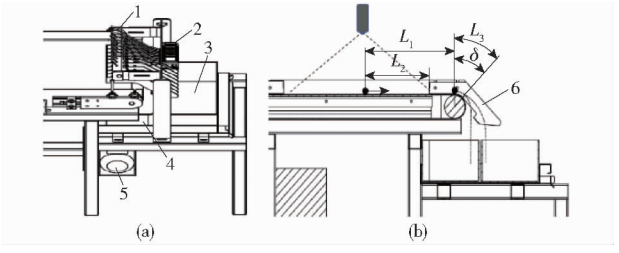


图 9　分选部件结构示意图

Fig. 9　Schematics of structure of sorting component

1. 气管　2. 高频二通阀　3. 收料盒 A　4. 收料盒 B　5. 空气压缩机　6. 分选板

通过调整高频二通阀的开合，对劣质种子吹气，落于收料盒 A 内；优质种子不处理落于收料盒 B 内，完成不同品质种子的分选，运动轨迹如图 9b 所示。分选部件需考虑模型检测时长和图像采集到高频二通阀气吹的分选总时长。自采集到分选区域前的时间为 T_1，而模型的识别时长需低于 T_1；高频二通阀在气压 0.25 MPa 时，开合响应时间分别为 0.45 ms 与 0.4 ms，种子于分选区域处理时间需大于 0.85 ms。从采集到分选区域籽粒匀速前行，时间 T_1 计算式为

$$T_1 = L_1 / v_0 \tag{7}$$

式中　L_1——采集与分选区域总长度，为 36.5 cm

v_0——传送带速度，为 10 cm/s

通过公式（7）计算得 $T_1 = 3.65$ s。L_2 为种子自采集区域长度，为 7.5 cm，此阶段作为种子采集的间歇时间 T_2，图像采集间隔时间小于 T_2 时，满足图像采集需求，时间 T_2 计算式为

$$T_2 = L_2 / v_0 \tag{8}$$

通过公式（8）计算得 $T_2 = 0.75$ s。模型检测时间需低于 0.75 s，装置选用模型平均检测时间为 5.8 ms，满足使用要求。

种子在转轴边缘转动，该阶段种子速度等于传送带速度，时间 T_3 计算式为

$$T_3 = \frac{\pi R \varepsilon}{180 v_0} \tag{9}$$

式中　R——转轴半径与传送带厚度之和，为 3.2 cm

ε——脱离传送带时与水平面的夹角，为 45°

计算可得 $T_3 = 231.2$ ms，远大于高频二通阀响应时长 0.85 ms，高频二通阀满足使用要求。

综上所述，装置自图像采集到完成分选时长为 $T = T_1 + T_3 = 3.881\ 2$ s。选用模型检测的平均时长约为 5.8 ms，高频二通阀开合总时长为 0.85 ms，信号传输时长低于 3.8 s，满足模型检测到二通阀开合的总时长，高频二通阀在分选单元可作为吹气阀，满足种子分选要求。

2.4　控制系统

控制系统由送料控制器、工控机、计算机、光耦固态继电器等组成。送料控制器控制振动器的电压和频率，工控机控制传送带速度，计算机连接相机采集图像，光耦固态继电器控制高频二通阀的开合，完成分选。

装置的系统控制流程如图 10 所示。装置接入电源，点亮 LED 灯，空气压缩机启动，为检测与分选做好准备；送料控制器调整振动器的频率和电压，种子逐粒落于传送带；工控机调节传送带速度为 10 cm/s；计算机连接工业相机，对种子进行图像采集，并由模型识别种子；继电器控制高频二通阀的开合，气吹分选种子。

2.5　装置排种效果分析

装置的排种效果随着振动器振幅和频率等工作参数变化而变化，如图 11 所示。当两盘的振幅和频率调整至合适时，种子与两盘形成较好配合，运动现

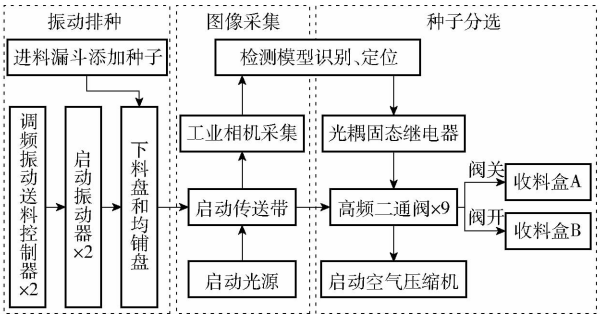


图 10 系统控制流程图

Fig. 10 System control flowchart

象如图 11b、11e 所示；当两盘的振幅和频率较小时，种子仍停留在下料盘内或相对运动较小，运动现象如图 11a、11d 所示；当两盘的振动器振幅和频率较大时，种子与两盘的相对运动较大，发生如图 11c、11f 的运动。因此，较优的振幅和频率参数组合对装置的排种效果至关重要，不仅减少了籽粒的贴合问题，同时提高了装置的分选效率。本研究将通过四因素三水平试验选取装置的较优参数组合。

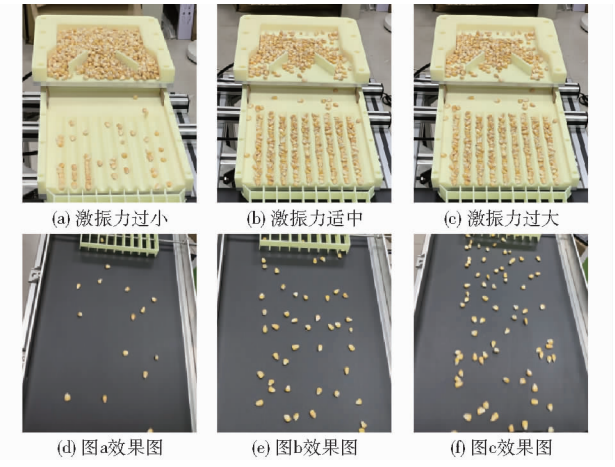


图 11 装置的排种效果图

Fig. 11 Seed metering effect diagrams of device

3 试验设计与结果分析

3.1 试验条件

试验对象选取“郑单 958”玉米种子，形态为硬粒马齿形[30]，经测量千粒种子为 224 g，对种子检测与分选装置展开性能试验。试验地点为北京市农林科学院智能装备技术研究中心综合实验室，试验准备 3 000 颗籽粒，下料盘和均铺盘由 3D 打印获得，传送带使用黑色外表为图像采集提供单一颜色背景。

3.2 试验指标

试验准备 3 000 粒玉米种子，通过实测试验，装置运行时长设 3 min。本研究进行 29 组试验，每组获取 20 幅图像。同一组图像计算均值作为此组的试验结果，同一轨道相邻种子距离分布计算如图 12 所示，其中图 12a 为工业相机采集的图像，图 12b 为种子分布计算图，图中黑色虚线为轨道线，绿色线条为合格粒距，红色线条为不合格粒距。自模型检测到高频二通阀的开合时长共计 0.18 s，计算得同一轨道相邻籽粒中心距 1.8 cm 为合格粒距，本文将相邻籽粒中心距 $d \geqslant 2.0$ cm 视为合格粒距，反之为不合格粒距。

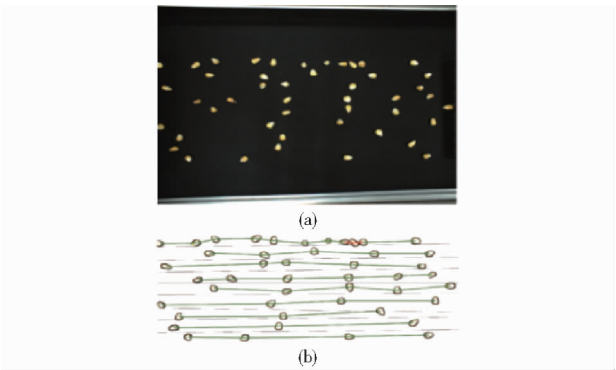


图 12 种子距离分布计算示意图

Fig. 12 Schematics of seed distance distribution calculation

工作试验数据获取自振动器启动计时，振动约 25 s 籽粒方可落于传送带，传送带速度设定匀速 10 cm/s。根据种子检验与分选要求，参考 GB/T 3543.3—2025《农作物种子检验规程》等标准规程，以粒距合格率 Z_1、籽粒贴合率 Z_2、籽粒残留率 Z_3 为试验指标。

3.3 试验设计

试验考虑种子检测与分选作业需求，以下料盘电压 X_1、振动频率 X_2 和均铺盘电压 X_3、振动频率 X_4 为试验因素，设计四因素三水平试验，探索种子检测与分选装置的最佳工作状况[32]，试验因素编码如表 3 所示。用 Design-Expert 13.0 软件对表 4 中的试验数据进行回归分析，得出性能指标与因素编码值回归方程，并验证其显著性，试验方案与结果如表 4 所示。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Coding of experimental factors

编码	下料盘电压 X_1/V	下料盘振动频率 X_2/Hz	均铺盘电压 X_3/V	均铺盘振动频率 X_4/Hz
1	60	48.0	65	52.0
0	55	47.0	60	51.0
-1	50	46.0	55	50.0

3.4 显著性检验与回归方程

选择 Box-Behnken 试验对表 4 中数据进行分析，分别建立粒距合格率 Z_1、籽粒贴合率 Z_2、籽粒残留率 Z_3 的有效回归方程，得出 4 个影响因素的显著性水平。

(1)粒距合格率 Z_1 方差分析如表 5 所示，试验

表 4　试验方案与结果

Tab. 4　Test scheme and results

序号	下料盘电压 X_1/V	下料盘振动频率 X_2/Hz	均铺盘电压 X_3/V	均铺盘振动频率 X_4/Hz	粒距合格率 Z_1/%	籽粒贴合率 Z_2/%	籽粒残留率 Z_3/%
1	55	47	60	51	90.6	3.8	2.0
2	60	46	60	51	87.1	4.0	2.3
3	60	47	55	51	87.0	4.2	2.1
4	55	47	60	51	87.5	4.0	2.7
5	50	47	60	51	89.3	3.6	4.5
6	55	47	55	50	87.2	4.1	5.0
7	60	47	65	51	77.8	6.6	0.3
8	55	46	55	51	93.3	2.4	4.2
9	55	46	65	51	89.3	3.0	0.3
10	50	47	60	52	86.3	2.6	3.4
11	55	48	65	51	80.6	5.1	0.3
12	50	47	65	51	88.8	3.7	2.7
13	55	48	60	52	78.9	5.8	0.1
14	55	47	55	52	86.5	4.0	2.7
15	60	47	60	52	78.0	6.0	0.1
16	55	46	60	52	82.7	4.1	0.1
17	55	47	60	51	87.7	3.7	0.5
18	50	46	60	51	88.9	3.3	7.2
19	50	47	60	50	87.5	3.8	5.8
20	60	47	60	50	74.6	6.5	0.9
21	55	48	55	51	80.2	5.2	0.6
22	55	47	65	52	76.9	5.7	0
23	55	47	60	51	87.0	4.4	1.1
24	60	48	60	51	74.3	7.7	0.6
25	50	48	60	51	85.2	4.1	2.5
26	55	46	60	50	87.1	4.1	5.9
27	55	47	65	50	82.6	4.9	0.8
28	55	48	60	50	79.6	6.0	1.4
29	50	47	55	51	89.7	2.8	3.5

表 5　粒距合格率 Z_1 方差分析

Tab. 5　Analysis of variance for the qualified rate of particle size Z_1

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	679.12	8	84.89	11.60	<0.000 1 **
X_1	177.57	1	177.57	42.46	<0.000 1 **
X_2	205.01	1	205.01	49.02	<0.000 1 **
X_3	57.55	1	57.55	13.76	0.002 3 **
X_4	7.21	1	7.21	1.72	0.210 4
X_1X_2	20.70	1	20.70	4.95	0.043 0 *
X_1^2	27.34	1	27.34	6.54	0.022 8 *
X_2^2	22.65	1	22.65	5.41	0.035 5 *
X_4^2	115.26	1	115.26	27.56	0.000 1 **
残差	58.55	14	4.18		
失拟项	50.12	10	5.012	2.41	0.206 1
纯误差	8.34	4	2.09		
总和	737.67	28			

注：** 表示极显著（$P<0.01$）；* 表示显著（$0.01\leqslant P<0.05$）；下同。

因素 X_1、X_2、X_3、X_4^2 达到极显著水平；X_1X_2、X_2^2 和 X_1^2 达到显著水平；其余项均不显著，分析显著试验因素项去除不显著试验因素，得到 Z_1 有效回归方程

$$Z_1 = 88.13 - 3.95x_1 - 4.13x_2 - 2.31x_3 - 0.775x_4 - 2.27x_1x_2 - 2.2x_1^2 - 1.92x_2^2 - 4.33x_4^2 \quad (10)$$

式中　x_1、x_2、x_3、x_4——因素编码值

由表 5 中的 F 和 P 可知，X_1、X_2、X_3 是影响种子粒距的主要因素，影响 Z_1 的因素显著性由大到小为 X_2、X_1、X_3、X_4。

（2）籽粒贴合率 Z_2 方差分析如表 6 所示，试验因素 X_1、X_2、X_3 达到极显著水平；交互项 X_1X_2 和二次项 X_4^2 达到显著水平；其余项均不显著。分析显著试验因素项去除不显著试验因素项，得到 Z_2 有效回归方程

$$Z_2 = 4.02 + 1.19x_1 + 1.08x_2 + 0.461\,9x_3 - 0.1x_4 + 0.725x_1x_2 + 0.605\,7x_4^2 \quad (11)$$

由表 6 中的 F 值和 P 值可知，X_1、X_2 和 X_3 是影响种子贴合的主要因素，影响 Z_2 的因素显著性由大到小为 X_1、X_2、X_3、X_4。

表 6　籽粒贴合率 Z_2 方差分析

Tab. 6　Analysis of variance for grain fitting rate Z_2

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	42.57	6	3.04	11.13	<0.000 1 **
X_1	16.00	1	16	58.68	<0.000 1 **
X_2	14.08	1	14.08	51.55	<0.000 1 **
X_3	2.45	1	2.45	8.96	0.009 7 **
X_4	0.12	1	0.12	0.44	0.518 2
X_1X_2	2.10	1	2.10	7.70	0.014 9 *
X_4^2	2.25	1	2.25	8.24	0.012 3 *
残差	3.82	14	0.27		
失拟项	3.13	10	0.31	1.81	0.298 2
纯误差	0.692 5	4	0.173 1		
总和	46.39	28			

（3）籽粒残留率 Z_3 方差分析如表 7 所示，试验因素 X_1、X_2、X_3、X_4、二次项 X_1^2 达到极显著水平；交互项 X_2X_4 达到显著水平；其余项均不显著。分析显著试验因素项去除不显著试验因素项，得到 Z_3 有效回归方程

$$Z_3 = 1.56 - 1.84x_1 - 1.21x_2 - 1.35x_3 - 1.12x_4 + 1.13x_2x_4 + 1.22x_1^2 \quad (12)$$

由表 7 中的 F 值和 P 值可知，X_1、X_2、X_3、X_4 是影响两盘内籽粒残留的主要因素，影响 Z_3 的因素显著性由大到小为 X_1、X_3、X_2、X_4。

由以上方差分析可知，粒距合格率 Z_1、粒贴合率 Z_2、籽粒残留率 Z_3 的回归模型 P 均小于 0.000 1，失拟项均大于 0.05，表明以上 3 个回归模型均极显

表 7 籽粒残留率 Z_3 方差分析

Tab. 7 Analysis of variance for grain residue rate Z_3

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	105.23	6	7.52	10.53	<0.000 1 **
X_1	38.72	1	38.72	54.26	<0.000 1 **
X_2	17.52	1	17.52	24.55	0.000 2 **
X_3	19.69	1	19.69	27.60	0.000 1 **
X_4	14.96	1	14.96	20.97	0.000 4 **
X_2X_4	5.06	1	5.06	7.09	0.018 5 *
X_1^2	8.41	1	8.41	11.78	0.004 **
残差	9.99	14	0.713 5		
失拟项	6.84	10	0.684 2	0.869 5	0.611 8
纯误差	3.15	4	0.786 9		
总和	115.22	28			

著,失拟项均不显著,且回归模型方程拟合度较高。决定系数 R^2 分别为 0.921、0.918 和 0.913,且实际 R^2 与预测 R^2 之间差值均小于 0.2,表明建立的模型可靠且预测值与试验值吻合度高,可以对籽粒进行分析和优化。而各因素的交互作用在一定程度上影响了所有的响应变量,故需结合响应面分析法,确定两盘电压和振动频率的较优组合。

3.5 各因素对试验指标响应效应分析

由图 13 的响应面图可知,给定 X_3 为 60 V 和 X_4 为 51 Hz 时,若 X_2 固定,Z_1 随着 X_1 的增大先增大后减小;若 X_1 固定,Z_1 随 X_2 的增大先增大后减小。可得 Z_1 在 X_1 和 X_2 的交互作用下,X_2 在 46.0 ~ 47.0 Hz 和 X_1 在 56 ~ 60 V 之间存在 Z_1 最大的较优组合。

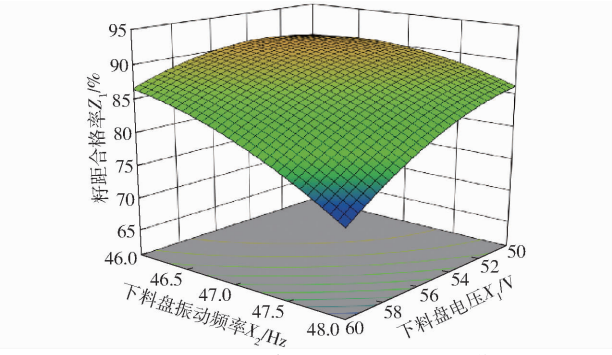


图 13 下料盘振动频率 X_2 和电压 X_1 交互作用对粒距合格率 Z_1 影响的响应曲面

Fig. 13 Response surface of influence of interaction between vibration frequency X_2 and voltage X_1 of blanking tray on qualified rate Z_1 of particle distance

由图 14 的响应面图可知,给定 X_3 为 60 V 和 X_4 为 51 Hz 时,若 X_2 固定,Z_2 随着 X_1 的增大而增大;若 X_1 固定,Z_2 随着 X_2 的增大而增大。可得 Z_2 在 X_1 和 X_2 的交互作用下,X_2 在 46.0 ~ 47.0 Hz、X_1 在 50 ~ 60 V 之间存在 Z_2 最小的较优组合。

由图 15 的响应面图可知,当 X_1 为 55 V 和 X_3 为

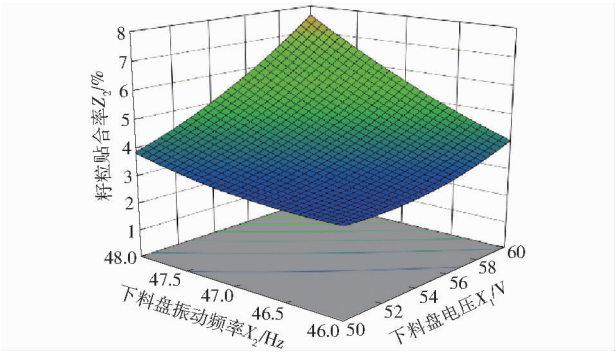


图 14 下料盘振动频率 X_2 和电压 X_1 交互作用对籽粒贴合率 Z_2 影响的响应曲面

Fig. 14 Response surface of influence of interaction between vibration frequency X_2 of blanking tray and voltage X_1 on grain fitting rate Z_2

60 V 时,若 X_2 固定,Z_3 随着 X_4 的增大而减小;若 X_4 固定,Z_3 随着 X_2 的增大而减小。可得 Z_3 在 X_2 和 X_4 的交互作用下,X_2 在 46.0 ~ 48.0 Hz 和 X_4 在 51.0 ~ 52.0 Hz 之间存在 Z_3 最小的较优组合。

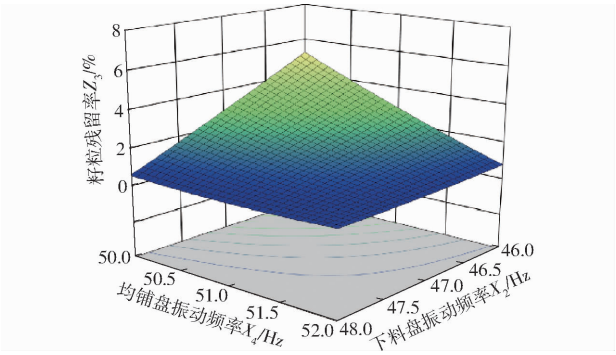


图 15 下料盘和均铺盘的振动频率 X_2、X_4 交互作用对籽粒残留率 Z_3 影响的响应曲面

Fig. 15 Response surface of influence of interaction of vibration frequencies X_2 and X_4 of blanking tray and uniform spreading tray on grain residue rate Z_3

分析以上响应面可得:当 X_2 增大至 46.0 ~ 47.0 Hz 区间,种子的 Z_1 存在较大值,Z_2 存在较小值。当继续增大 X_2,Z_3 存在较小值,但 Z_1 将快速下降,分析其原因为 X_2 影响种子落至均铺盘的速度。当 X_2 达到最优值,配合均铺盘的振动,种子落于传送带上实现较大 Z_1,若增大 X_2 种子运动过快,增大或减小均铺盘的振动,会减小传送带上种子的距离或种子在均铺盘上过快堆积,均不满足种子的检测和分选要求。此时,当增大 X_4,两盘中残留籽粒自然减少。

故此 X_1 在 51 ~ 60 V、X_2 在 46.0 ~ 47.0 Hz、X_3 在 55 ~ 65 V、X_4 在 51 ~ 52 Hz 区间内种子可实现较大的粒距合格率。合适的 X_1 和 X_2 均影响传送带上粒距,因为下料盘振动的快慢直接影响种子落于均铺盘的速度,过快种子堆积于均铺盘,造成传送带上种子粒距过小甚至贴合,过慢种子停留于下料盘或落

于均铺盘的数量较少，造成传送带上的种子粒距过大，装置的检测效率降低和分选效果变差。

3.6　参数优化

通过 Design-Expert 13.0 软件对试验回归模型进行优化求解，以粒距合格率 Z_1 最大值、籽粒贴合率 Z_2 最小值和籽粒残留率 Z_3 最小值为优化目标，下料盘电压 X_1、下料盘振动频率 X_2、均铺盘电压 X_3 和均铺盘振动频率 X_4 为优化对象，使用 Optimization 模块，优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Z_1(X_1,X_2,X_3,X_4) \\ \min Z_2(X_1,X_2,X_3,X_4) \\ \min Z_3(X_1,X_2,X_3,X_4) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 50\ \text{V} \leqslant X_1 \leqslant 60\ \text{V} \\ 46\ \text{Hz} \leqslant X_2 \leqslant 48\ \text{Hz} \\ 55\ \text{V} \leqslant X_3 \leqslant 65\ \text{V} \\ 50\ \text{Hz} \leqslant X_4 \leqslant 52\ \text{Hz} \end{cases} \end{cases} \tag{13}$$

得到装置振动排种的较优工作参数组合：X_1 为 60 V，X_2 为 46.0 Hz，X_3 为 55 V，X_4 为 51.6 Hz，此时对应的粒距合格率 Z_1 为 90.6%，籽粒贴合率 Z_2 为 2.8%，籽粒残留率 Z_3 为 2.2%。

4　验证试验

以 3 000 粒“郑单 958”玉米种子为试验对象，通过调整振动送料控制器参数：X_1 = 60 V，X_2 = 46.0 Hz，X_3 = 55 V，X_4 = 51.6 Hz，装置进行 3 次重复验证试验，时长设 3 min，试验数据的平均值作为试验的验证值，试验效果如图 16 所示，验证结果如表 8 所示。与模型优化预测结果相对误差小于 5%，装置对种子的检测与分选速度达 1 000 粒/min。

由表 8 中的试验验证结果可知，当以上述参数组合调控振动器，得到平均粒距合格率为 90.5%、平均籽粒贴合率为 2.9%、平均籽粒残留率为 2.3%，传送带上种子实现了较高的粒距合格率、较低籽粒贴合率、较低籽粒残留率的平衡，排种部件满足种子检测与分选需求。

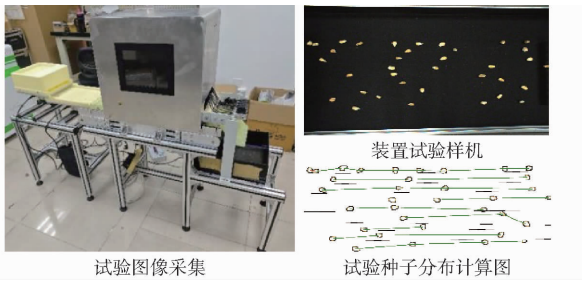


图 16　装置作业效果图

Fig. 16　Renderings of device operation

表 8　装置试验验证结果

Tab. 8　Device test verification results　%

试验号	粒距合格率 Z_1	籽粒贴合率 Z_2	籽粒残留率 Z_3
1	89.5	2.9	2.4
2	90.0	3.1	2.0
3	92.1	2.7	2.5
平均值	90.5	2.9	2.3

5　结论

(1)设计了双复合振动排种式种子检测与分选装置，解决了检测与分选效率低、籽粒贴合严重、籽粒脱轨掉落等现象。由振动器带动种子逐粒平铺传送带表面，使籽粒间距满足装置检测分选条件。

(2)下料盘电压 X_1、振动频率 X_2 和均铺盘电压 X_3、振动频率 X_4 以及交互作用是籽粒是否满足检测与分选的主要影响因素，试验采用多元拟合得到粒距合格率 Z_1、籽粒贴合率 Z_2、籽粒残留率 Z_3 的回归方程。通过试验结果分析，确定了四因素及交互作用对粒距合格率、籽粒贴合率、籽粒残留率有较大影响。

(3)对试验结果进行优化分析与验证，当传送带速度为 10 cm/s，下料盘电压、振动频率分别为 60 V、46.0 Hz，均铺盘电压、振动频率分别为 55 V、51.6 Hz 时，作业效果最佳。粒距合格率达到 90.5%、籽粒贴合率达到 2.9%、籽粒残留率达到 2.3%，与模型优化预测结果相对误差小于 5%。装置对种子检测与分选速度达 1 000 粒/min，满足种质资源精选入库的需求。

参　考　文　献

[1]　卢新雄. 农业种质库的设计与建设要求探讨[J]. 农业工程学报, 2003,19(6): 252 - 255.
LU Xinxiong. Design and construction of agricultural germplasm genebank[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 252 - 255. (in Chinese)

[2]　李永磊, 万里鹏程, 陈海军, 等. 批次式种子清选装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 48 - 58.
LI Yonglei, WAN Lipengcheng, CHEN Haijun, et al. Design and experiment of batch seed cleaning device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(23): 48 - 58. (in Chinese)

[3]　吴凌云, 李明. 种子清选精选技术[J]. 种子, 2009, 28(10): 120 - 123.
WU Lingyun, LI Ming. The technology of seed cleaning and upgrading[J]. Seed, 2009, 28(10): 120 - 123. (in Chinese)

[4]　李丹, 王晓玉, 杨玉, 等. 主要农作物种子质量标准体系现状与展望[J]. 中国种业, 2023(2): 1 - 9.
LI Dan, WANG Xiaoyu, YANG Yu, et al. The present situation and prospect of seed quality standard system of main crops

[J]. China Seed, 2023(2): 1 - 9. (in Chinese)
[5] MCDONALD M B. Assessment of seed quality1[J]. HortScience, 1980, 15(6): 784 - 788.
[6] SONG C, PENG B, WANG H, et al. Maize seed appearance quality assessment based on improved Inception - ResNet[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1 - 13.
[7] FENG Y, ZHAN X, TIAN R, et al. Research on an intelligent seed-sorting method and sorter based on machine vision and lightweight YOLOv5n[J]. Agronomy, 2024, 14(9): 1953.
[8] CIJBESCU D, NENCIU F, PERSU C, et al. Evaluation of an optical sorter effectiveness in separating maize seeds intended for sowing[J]. Applied Sciences, 2023, 13(15): 8892.
[9] XU P, YANG R, ZENG T, et al. Varietal classification of maize seeds using computer vision and machine learning techniques [J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(11): e13846.
[10] 张楠楠. 基于嵌入式系统的粮食霉变检测装置研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2014.
ZHANG Nannan. Research on the moldy grain detection device based on the embedded system[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014. (in Chinese)
[11] YU H, ZHAO J, BI C, et al. Study on the germination rate of maize seeds based on improved YOLOv8n model[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16:1 - 19.
[12] 王超鹏. 基于机器视觉与光谱成像技术的玉米种子品质检测与分选[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
WANG Chaopeng. Inspection and classification for the quality of maize seeds based on machine vision and spectral imaging technology[D]. Yangling: Northwest A&F University,2017. (in Chinese)
[13] MANCERA-RICO A, VAZQUEZ-BADILLO M E, CERNA-CHAVEZ E, et al. *Sitophilus zeamais* (coleoptera: curculionidae) activity and germination of corn seeds stored under vacuum pressure[J]. Agriculture, 2023, 13(10): 2035.
[14] 杨薇, 方宪法, 李建东, 等. 种腔自净型气吸式玉米小区精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 64 - 73.
YANG Wei, FANG Xianfa, LI Jiandong, et al. Design and experiment of air-suction precision seed meter with self-clearing seed chamber for corn plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 64 - 73. (in Chinese)
[15] ZHANG Y, LV C, WANG D, et al. A novel image detection method for internal cracks in corn seeds in an industrial inspection line[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106930.
[16] MUKASE P, SEMYALO D, FAQEERZADA M A, et al. Deep learning application for real-time gravity-assisted seed conveying system for watermelon seeds purity sorting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108974.
[17] 王侨, 陈兵旗, 朱德利, 等. 基于机器视觉的定向播种用玉米种粒精选装置研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 27 - 37.
WANG Qiao, CHEN Bingqi, ZHU Deli, et al. Machine vision-based selection machine of corn seed used for directional seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2): 27 - 37. (in Chinese)
[18] 张楠楠, 刘伟, 王伟, 等. 基于图像处理的玉米颗粒霉变程度检测方法研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 112 - 116.
ZHANG Nannan, LIU Wei, WANG Wei, et al. Research on detection of moldy degree for corn kernels based on image processing[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(10): 112 - 116. (in Chinese)
[19] HEO Y J, KIM S J, KIM D, et al. Super-high-purity seed sorter using low-latency image-recognition based on deep learning [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(4): 3035 - 3042.
[20] 吴明亮, 谢方平, 唐伦, 等. 杂交水稻工程化制种窝眼型孔分选机分选筒设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 1 - 4.
WU Mingliang, XIE Fangping, TANG Lun, et al. Design of separating cylinder of pocket hole separating machine on large-scale seeding production for hybrid rice[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 1 - 4. (in Chinese)
[21] 王旭, 王春光, 王全喜, 等. 种子重力分选机预分层喂料系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 80 - 88.
WANG Xu, WANG Chunguang, WANG Quanxi, et al. Design and experiment of pre-stratification feeding system for gravity seed separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 80 - 88. (in Chinese)
[22] NIU S, XU X, LIANG A, et al. Research on a lightweight method for maize seed quality detection based on improved YOLOv8 [J]. IEEE Access, 2024, 12: 32927 - 32937.
[23] 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)
[24] 封玉搏, 赵晓顺, 范晓飞, 等. 基于机器视觉的智能种子分选机设计[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(8): 204 - 212.
FENG Yubo, ZHAO Xiaoshun, FAN Xiaofei, et al. Design of an intelligent seed sorter machine based on machine vision[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(8): 204 - 212. (in Chinese)

(下转第 202 页)

ZHOU Haili, YAN Mengying, XUE Hongbin, et al. Design and experiment of sweet potato transplanting mechanism with elliptical gear planetary gear train[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Science Edition), 2025, 53(1): 96 - 104. (in Chinese)

[19] 邓斌. 甘薯苗变性椭圆齿轮行星轮系移栽机构设计与试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
DENG Bin. Design and experiment of sweet potato seedling transplanting mechanism with modified elliptical gear planetary gear train[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022. (in Chinese)

[20] 武广伟,安晓飞,颜丙新,等. 基于预处理苗带甘薯裸苗自动移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 1): 99 - 109.
WU Guangwei, AN Xiaofei, YAN Bingxin, et al. Design and experiment of automatic transplanter for sweet potato seedlings based on pre-treated seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 99 - 109. (in Chinese)

[21] 秦宽,魏新钊,李光耀,等. 软夹轮压式甘薯移栽机设计与试验[J]. 东北农业大学学报,2024,55(4):73 - 84.
QIN Kuan, WEI Xinzhao, LI Guangyao, et al. Design and experiment of soft clamp wheel pressure sweet potato transplanter [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55(4): 73 - 84. (in Chinese)

[22] 穆桂脂,王千翼,郑德慧,等. 甘薯横向水平复式移栽机栽苗装置设计及试验[J]. 农业工程学报,2023,39(24):1 - 10.
MU Guizhi, WANG Qianyi, ZHENG Dehui, et al. Design and experiment of sweet potato horizontal duplex transplanter seedling planting device[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 1 - 10. (in Chinese)

[23] WOODARD A J, SCHULTHEIS J R, JENNINGS K M, et al. Horizontal planting orientation can improve yield in organically grown sweet potato[J]. HortScience, 2024, 59(1): 36 - 42.

[24] 芦泽鹏. 打捆机器人高能效优化设计与能耗分析[D]. 太原: 太原理工大学,2022.
LU Zepeng. High-efficiency optimization design and energy consumption analysis of baling robot[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022. (in Chinese)

[25] 封雨鑫,钟菲,余强. 连续小线段的高精度 B 样条曲线拟合方法[J]. 自动化技术与应用,2022,41(6):15 - 20.
FENG Yuxin, ZHONG Fei, YU Qiang. High-precision B-spline curve fitting method for continuous small line segments[J]. Automation Technology and Applications, 2022, 41(6): 15 - 20. (in Chinese)

[26] 赵宏平,郭彩芬. 一种匀变非圆齿轮设计方法及其传动特性研究[J]. 机械传动,2021,45(11):109 - 115,133.
ZHAO Hongping, GUO Caifen. Research on a design method of uniformly variable non-circular gear and its transmission characteristics[J]. Mechanical Transmission, 2021, 45(11): 109 - 115,133. (in Chinese)

(上接第 174 页)

[25] 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)

[26] PEARSON T. Hardware-based image processing for high-speed inspection of grains[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(1): 12 - 18.

[27] 颜丙新, 武广伟, 付卫强, 等. 基于 EDEM 的玉米精播高位投种着床位置影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 47 - 54.
YAN Bingxin, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Influencing factors of corn implantation distribution for high-height planting based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 47 - 54. (in Chinese)

[28] 何晓宁, 王如正, 杨紫奥, 等. 毛刷带式玉米高速导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 17 - 27.
HE Xiaoning, WANG Ruzheng, YANG Ziao, et al. Design and experiment for the high-speed maize seed guiding device with brush belt[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(8): 17 - 27. (in Chinese)

[29] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36 - 42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36 - 42. (in Chinese)

[30] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34 - 41.
CUI Tao, LIU Jia, YANG Li, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 34 - 41. (in Chinese)

[31] MARKAUSKAS D, RAMIREZ-GOMEZ Á, KACIANAUSKAS R, et al. Maize grain shape approaches for DEM modelling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118: 247 - 258.

[32] 杜双奎. 试验优化设计与统计分析 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2020.