

柔性带式蒜头夹持定向投种装置设计与试验

康启新¹ 张国忠^{1,2} 赵状状¹ 刘婉茹¹ 唐楠锐¹ 刘浩蓬^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对蒜头 (*Allium chinense*) 机械化种植时鳞芽朝向的农艺要求, 基于勺夹式蒜头排种器设计了一种由喂入挡板、电机、同步带轮、夹持带等组成的柔性带式蒜头夹持定向投种装置。对投种装置的喂入、夹持正姿和投种过程进行理论分析, 确定了关键部件结构及参数。建立多柔性体动力学和离散元法耦合仿真模型, 以投种横卧率、落种横卧率、穴距合格率为试验指标, 采用 Plackett - Burman 试验法开展夹持带倾角、理论输送速度、带速差比、夹持带间距及喂入半径的五因素显著性筛选耦合仿真试验, 并以夹持带倾角、理论输送速度、带速差比为试验因素进行回归正交田间试验; 通过 Box - Behnken 中心试验法建立投种横卧率和穴距合格率的回归模型, 并开展参数优化, 获得最优参数组合为: 夹持带倾角 65°、理论输送速度 0.38 m/s、带速差比 1.64。在最优参数下进行 3 次田间试验, 结果表明在前进速度 0.16 m/s 的条件下, 该装置平均投种横卧率和平均穴距合格率分别为 61.11%、78.89%, 与回归模型预测值分别相差 4.17、1.15 个百分点。

关键词: 蒜头; 播种机; 正姿投种; 柔性体; DEM - MFBD

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)05-0246-11 **OSID:** 

Design and Experiment of Flexible Belt Clamp Directional Discharging Device for *Allium chinense*

KANG Qixin¹ ZHANG Guozhong^{1,2} ZHAO Zhuangzhuang¹ LIU Wanru¹ TANG Nanrui¹ LIU Haopeng^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: The *Allium chinense*, a perennial plant of the *Allium* genus in the lily family, is predominantly found in the Yangtze River basin and southern regions of China, with a cultivation area exceeding 6.6×10^4 hm². It boasts a unique flavor and high medicinal and edible value, being extensively exported to countries such as Japan and South Korea. It has become a characteristic industry and foreign exchange product for implementing the “Rural Revitalization” strategy in some areas, with broad market prospects. Currently, the cultivation of *Allium chinense* largely relies on manual labor, which is physically demanding and costly, thus hindering the industry’s large-scale development. There is an urgent need to develop and apply mechanized planting equipment for *Allium chinense*. Aiming to address the agronomic specifications regarding the orientation of bud scales and the engineering requirements for low-position discharging during the mechanized planting of *Allium chinense*, a flexible belt clamp directional discharging device for *Allium chinense*, based on the spoon clip type seed metering device was engineered. The mechanism comprised a feed deflector, conveyor systems, electric motors, synchronous pulleys, and flexible belts, among other components. The operational principle of the flexible belt clamp seed discharging device was subjected to theoretical analysis, with a focus on the feeding, seed posture correction, and seed discharging processes. This analysis facilitated the determination of the structural design and parametric specifications for critical components. A coupled simulation model was constructed, integrating multi-flexible body dynamics (MFBD) and the discrete element method (DEM). Using response such as the seed horizontal discharging rate, horizontal seeding rate, and

收稿日期: 2024 - 12 - 03 修回日期: 2024 - 12 - 28

基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系专项 (CARS - 24 - D - 02)

作者简介: 康启新 (1997—), 男, 博士生, 主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: kangqixin@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 张国忠 (1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

qualified rate of hole distance, a significance screening of the coupled simulation experiments was performed, considering five key factors: the clamp belt angle, theoretical conveying speed, belt speed differential ratio, clamp belt spacing, and feeding radius. Subsequently, a regression orthogonal field test was executed, focusing on the clamp belt angle, theoretical conveying speed, belt speed differential ratio as experimental variables. Employing the Plackett – Burman design and the Box – Behnken central composite design, regression models were formulated for the seed horizontal discharging rate and the qualified rate of hole distance. These models were then utilized for parameter optimization, yielding an optimal parameter set: a clamp belt angle of 65°, a theoretical conveying speed of 0.38 m/s, and a belt speed difference ratio of 1.64. Field test were conducted under the optimized parameters, and the findings indicated that at a forward speed of 0.16 m/s, the average seed horizontal discharging rate and the average qualified rate of hole distance achieved by the device were 61.11% and 78.89%, respectively. The experimental results demonstrated deficits of 4.17 and 1.15 percentage points relative to the model-predicted optima. The outcomes of this research can offer valuable insights for the development and design of mechanized orientation seed planting equipment for *Allium chinense*.

Key words: *Allium chinense*; planter; orientation seed discharging; flexible body; DEM – MFBD

0 引言

蒜头是百合科葱属多年生植物^[1],主要分布在中国长江流域及以南地区,目前全国种植面积已超过 $6.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其风味独特,食药价值高,大量出口日韩等国,已成为部分地区乡村振兴特色产业和创汇产品,市场前景广阔^[2-3]。当前,蒜头种植环节劳动强度大,人工成本高,制约了产业的规模化发展,亟待开发与应用蒜头机械化种植装备^[4]。由于蒜头、大蒜、玉米等在种植过程中存在朝向要求,需在精量排种的基础上进一步研究种子姿态调整、鳞芽朝向约束等定向播种技术^[5-9]。

国外对定向投种技术研究较早,1974 年 HAYDEN 等^[10]设计了一种带有弧形投种管和置种平面的定向播种开沟器,可将菜豆种子平躺播于种沟内,正姿效果较好,相比于无序播种,该装置定向播种后菜豆出苗更早、更均匀。韩国 HADA 公司开发的大蒜鳞芽定向播种机^[11],将蒜种夹持分离后依序投入中间正姿机构中,随即落入栽植机构中进行栽植,栽植正向合格率较高。国内学者提出多种大蒜定向播种方案^[12-14]。麻芳兰等^[15]研制了一种预切种式甘蔗横向排种器,其采用两级传送链槽结构形式,第 1 级完成分离运移,第 2 级实现换向投种并降低投种高度,实现了针对甘蔗精准横向播种。牟向伟等^[16]在勺链排种机构基础上进一步设计了振动调序供种装置,实现了预切木薯的整列与运移。目前根茎类作物播种姿态调整及投种技术主要采用鸭嘴栽植式、翻转链勺式、多级正姿杯方案^[17-18],由于蒜头种子外形尺寸较特殊,上述方案难以满足作业要求。

课题组前期针对蒜头种子的分离运移问题开展了精量排种技术研究,基于物料特性设计了一种勺

夹式蒜头排种器^[4,19]。为进一步改善鳞芽朝向性能,本文在上述勺夹式蒜头排种器上增设一种柔性带式夹持定向投种装置,采用 DEM – MFBD(离散元法-多柔性体动力学)方法对其工作过程开展仿真试验,并结合田间试验对关键结构参数进行优化与验证,以期为蒜头正姿播种机械设计提供参考。

1 投种装置结构与工作原理

湖北省崇阳县、武汉市江夏区等地是湖北省蒜头种植规模较集中区域,品种以大叶蒜为主,种植时以有长柄的水滴状蒜头鳞茎做种,如图 1a 所示,人工将鳞芽朝上斜卧置于“V”形种沟一侧,以有利于蒜头出苗和减少青果,并利于减少培土工作量^[2]。针对鳞芽朝向这一难点,经分析后确定采用柔性带式夹持投种装置,以实现姿态调节。

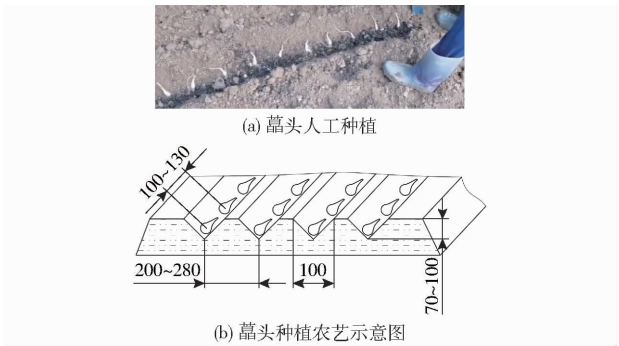


图 1 蒜头种植农艺要求
Fig. 1 Cultivation agronomic requirements for *Allium chinense*

1.1 总体结构

如图 2a 所示,蒜头柔性带式夹持投种装置由喂入挡板、上夹持带、下输送带、电机、同步带轮等组成。上夹持带和下输送带分别为橡胶海绵材质和橡胶材质,平行地安装于排种器下方,两带间距和与地面的安装倾角可调。喂入口两侧设置喂入挡板,以

利于种子经排种器释放后顺利喂入。驱动电机位于安装板间,经安装板外侧同步带驱动上夹持带和下输送带运转,电机旋转方向如图 2b 所示。

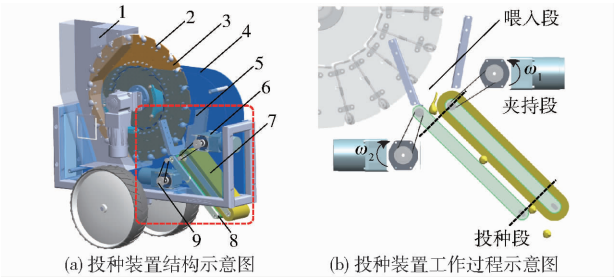


图 2 柔性带式耬头夹持投种装置结构与工作过程示意图
Fig.2 Diagrams of structure and working process of flexible belt clamp seed discharging device for *Allium chinense*
1. 种箱 2. 种勺 3. 排种盘 4. 安装板 5. 喂入挡板 6. 电机
7. 上夹持带 8. 下输送带 9. 同步带轮

1.2 工作原理

如图 2b 所示,柔性带式夹持投种装置工作过程分为喂入段、夹持段和投种段。勺夹式耬头排种器在电机的驱动下将耬头种子从群体中分离携带,在喂入段上方投种,耬头种子以随机姿态落入两夹持带间;在柔性带的支撑与摩擦下种子进入夹持段,当上带速大于下带速时,种子不仅在夹持下进行输送,还在差速作用下逐步扭转姿态,绕自身旋转轴旋转,从而完成种子姿态的调整,最终在装置末端呈横卧姿态投出。工作时,夹持投种装置的喂入、夹持、投种 3 个过程持续不断进行,满足排种器的间歇喂入。

2 关键参数设计与分析

2.1 喂入段

耬头种子经过排种器的取种、携种和投种后落入投种装置,在两带同向摩擦下夹持喂入并向后输送,种子在喂入段的受力情况如图 3 所示,当点 O 的 X 坐标小于等于点 O_1 时,耬头种子处于喂入阶段。图中,以耬头种子简化球心为点 O ,平行于夹持带并指向投种方向为 X 方向,垂直于夹持带向上为 Y 方向,建立平面直角坐标系 XOY 。 r 为耬头种子的简化球体半径,mm; r_1 为上夹持带的接触半径,mm; O_1 为上夹持带接触半径的圆心; δ 为 OO_1 与 Y 方向

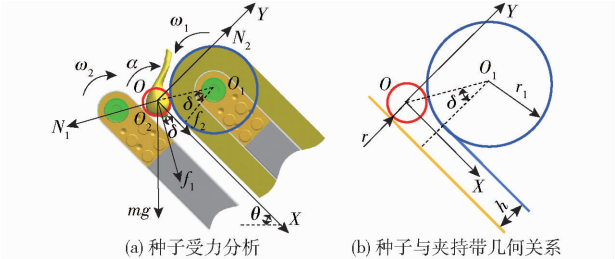


图 3 喂入段耬头种子受力分析
Fig.3 Force analysis of feeding area for *Allium chinense*

夹角, ($^{\circ}$); θ 为水平方向与与 X 方向夹角, ($^{\circ}$); h 为上夹持带与下输送带之间距离,mm; ω_1 、 ω_2 分别为上夹持带和下输送带的驱动轴角速度,rad/s; mg 为耬头种子所受重力,N; N_1 、 N_2 分别为上夹持带和下输送带对耬头种子的支持力,N; f_1 、 f_2 分别为上夹持带和下输送带对耬头种子的摩擦力,N; α 为耬头种子角加速度,rad/s²;角加速度和平面力矩以顺时针为正,下同。

对如图 3a 所示的 XOY 平面力系进行简化,忽略滚动摩擦,简化可得

$$\begin{cases} F_x = f_2 + f_1 \cos \delta + mg \sin \theta - N_1 \sin \delta \\ F_y = N_2 - f_1 \sin \delta - mg \cos \theta - N_1 \cos \delta \\ M_o = (f_1 r - f_2 r) / 1\,000 \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_x ——耬头种子在 X 方向所受合力,N
 F_y ——耬头种子在 Y 方向所受合力,N
 M_o ——种子所受平面力矩,N·m
 m ——耬头种子质量,kg

根据牛顿运动定律可得运动方程

$$\begin{cases} F_x = ma_x \\ F_y = ma_y \\ M_o = J_o \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中 a_x ——耬头种子在 X 方向加速度,m/s²
 a_y ——耬头种子在 Y 方向加速度,m/s²
 J_o ——种子在点 O 的转动惯量,kg·m²

由图 3 可知,耬头种子投入机构后,在两带摩擦力、支持力和重力的共同作用下获得沿 X 方向的加速度和转动力矩,种子由绝对静止到运动的临界状态可分为 2 种情况:相对滑动和有相对滑动的滚动^[20]。为使耬头种子能够高效喂入柔性夹持带中,以种子与带之间无相对滑动并做纯滚动为条件,耬头种子则应满足

$$\begin{cases} a_y = 0 \\ a_x = r \alpha \\ \alpha > 0 \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)可得,耬头种子开始喂入时,设上夹持带未变形且压力 N_1 不变,则随着喂入接触角 δ 的减小,支持力 N_2 和角加速度呈增大趋势,下输送带对种子的最大静摩擦力也随之增大,种子滑动喂入的趋势得以减小,逐步向有相对滑动的滚动转化。由式(3)可知,种子开始滚动喂入后,夹持带对种子的摩擦合力矩增大,种子呈加速滚动喂入状态。

由图 3 可知,为保证耬头种子顺利夹持需有充足的喂入空间,投种装置喂入端旋转轴间在 X 方向的距离应大于耬头种子长度,即

$$X_{O_1O_2} - r_1 \geq L \quad (4)$$

式中 $X_{O_1O_2}$ ——点 O_1 、 O_2 间在 X 方向的距离, mm

L ——蒜头种子平均长度, mm

由前期研究可知^[19], 大叶蒜种长 L 、宽 B 、厚 H 平均值为 43.47、21.68、18.28 mm, 种子简化球体半径 r 平均值为 14.2 mm, r_1 根据已有排种器结构及带托辊半径设置为 17~37 mm, 则有 $X_{O_1O_2} \geq 80$ mm, 为保证夹持效果, 两带间距 h 设为 10~18 mm。

2.2 夹持段

蒜头种子在柔性带的摩擦及夹持下随带运移, 上夹持带的弹性形变逐渐增大, 当点 O 的 X 坐标大于点 O_1 时, 蒜头种子对柔性夹持带产生的挤压形变趋于稳定, 种子进入夹持阶段。

蒜头种子在夹持段的受力情况如图 4 所示, 在 XOY 平面内将共点力向点 O 简化可得

$$\begin{cases} F_x = f_1 + f_2 + mgsin\theta - N_1sin\gamma \\ F_y = N_2 - N_1cos\gamma - mgcos\theta \\ M_o = (f_1r - f_2r) / 1000 \end{cases} \quad (5)$$

式中 γ ——上夹持带对蒜头种子支持力 N_1 与 Y 轴负方向的夹角, ($^\circ$)

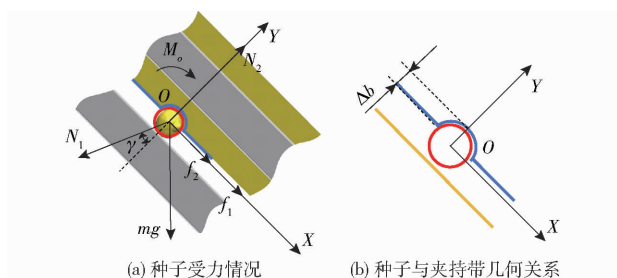


图 4 夹持段蒜头种子受力分析

Fig. 4 Force analysis of clamping area for *Allium chinense*

由式(5)可知, 种子进入夹持段后在滚动力矩的作用下发生滚动, 初始种子夹持姿态如图 5a 所示时, 种子自转轴与夹持带运动方向非垂直, 沿自转轴产生较大的滚动阻力, 夹持带提供的支持力 N_1 较大, 此时沿 X 方向的加速度较小。根据最小作用量原理^[9, 21], 支持力及摩擦力提供种子自转轴的偏转力矩, 使种子自转轴偏转为夹持带运动的垂直方向, 与种子滚动中心轴重合。调整过程中滚动阻力逐渐减小, 支持力和摩擦力减小, 蒜头种子将加速滚动到稳定状态, 此时支持力、摩擦力大小不变, 种子开始匀速滚动。

种子匀速纯滚动时, 根据 $a_x = 0$ 、 $\alpha = 0$ 有力和速度关系式

$$\begin{cases} f_1 = f_2 = \frac{1}{2}(N_1sin\gamma - mgsin\theta) \\ v_1 + v_2 = 2v_s \end{cases} \quad (6)$$

式中 v_1 ——上夹持带线速度, m/s

v_2 ——下输送带线速度, m/s

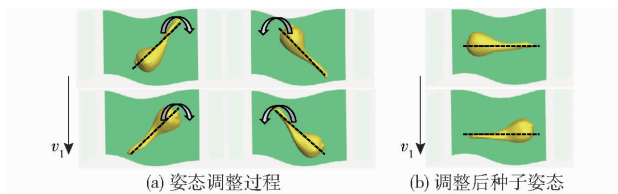


图 5 夹持段蒜头种子姿态调整示意图

Fig. 5 Diagrams of seed posture adjustment in clamping area

v_s ——理论输送速度, m/s

由式(6)可知, 种子的理论输送速度与夹持带速度相关。此外, 种子在向前滚动调姿时, 滑动摩擦力与支持力作功, 上下两带需发生相对运动, 即 $v_1 > v_2$ 时才满足滚动条件。

2.3 投种段

蒜头种子在夹持带差速输送作用下不断滚动, 当点 O 的 X 坐标大于点 O_3 时, 蒜头种子对上夹持带的挤压形变 Δb 逐渐减小, 点 O 在 Y 负方向产生位移, 蒜头种子进入投种阶段。

蒜头种子在投种段的受力情况如图 6 所示, 在 XOY 平面内将共点力向点 O 简化可得

$$\begin{cases} F_x = f_1 + f_2cos\beta + mgsin\theta + N_2sin\beta \\ F_y = N_2cos\beta - f_2sin\beta - mgcos\theta - N_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中 β —— OO_3 与 Y 方向的夹角, ($^\circ$)

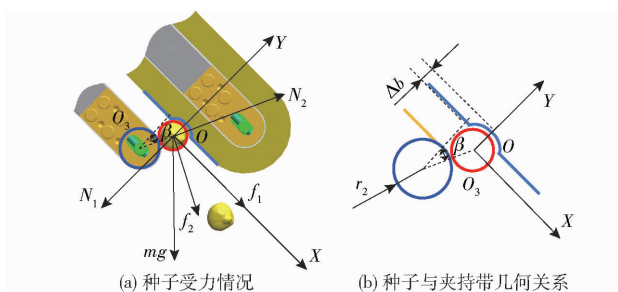


图 6 投种段蒜头种子受力分析

Fig. 6 Force analysis of discharging area for *Allium chinense*

投种过程中 Δb 减小, β 增大, $cos\beta$ 减小, 由式(7)可知, 蒜头种子将同时产生 X 方向和 Y 负方向的加速度, 种子做加速滚动至种子投出的临界位置。投种时蒜头种子尺寸不同, 投种临界状态不同。蒜头种子尺寸较大时, 种子与上下两带同时分离; 种子尺寸较小时, 上夹持带先与种子分离, 后在下输送带作用下向后抛送。为尽可能使上下带同步达到种子分离临界条件, 增大种子适用范围, 根据整体结构, 下输送带投种端与蒜头种子的接触半径 r_2 设置与上夹持带最小半径 r_1 相同, 为 17 mm。

2.4 夹持带倾角

蒜头种子从排种器到夹持投种装置的连续运动过程如图 7 所示, 以投种装置为参考系, 种子在夹持带中视为匀速滚动。为尽可能减小弹跳, 种子需满足“零速”投种要求, 即投种后水平速度与机具前进

表 1 主要仿真参数

Tab. 1 Main simulation parameters

参数	钢	橡胶材料	土壤颗粒	种子颗粒
密度/(kg·m ⁻³)	7 865	1 500	1 600	1 017
泊松比	0. 3	0. 285	0. 34	0. 2
弹性模量/MPa	2. 05 × 10 ⁵	3 500	2. 814	2. 740
碰撞恢复系数 (与畚头颗粒)	0. 5	0. 149	0. 45	0. 45
静摩擦因数 (与畚头颗粒)	0. 5	0. 614	0. 4	0. 435
动摩擦因数 (与畚头颗粒)	0. 01	0. 326	0. 14	0. 043
表面能/(J·m ⁻²) (与土壤颗粒)			4	

在 Joint 选项中对带托辊添加转动副和驱动,对模型整体添加直线副和驱动,对几何模型添加约束。直线副驱动中使用 STEP 函数设置 0.2 s 的缓加速过程。将模型中夹持带及挡板作为 WALL 文件输出并导入到 EDEM 离散元仿真模型中,开启 Recurdyn 与 EDEM 双向耦合接口,进行数据交换及存储。夹持投种过程的耦合仿真模型建立过程如图 8 所示。

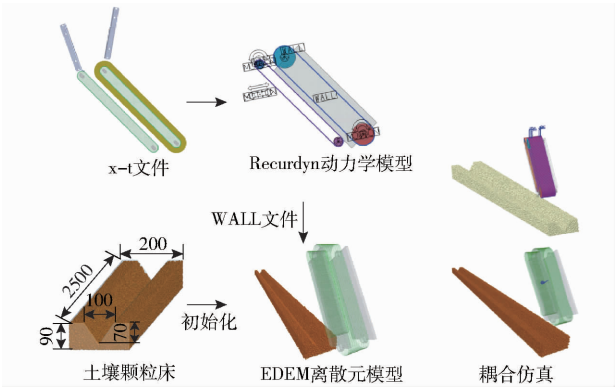


图 8 耦合仿真模型建立过程

Fig. 8 Coupled simulation modelling process

3.2 仿真试验方法

根据前文分析,为实现“零速”投种需根据上下带速差及理论输送速度 v_s 和夹持带倾角 θ 确定上下两带带速。因此,引入带速差比 k 衡量两夹持带速度的相差程度,计算式为

$$k = \frac{v_1 - v_2}{v_s}$$

(12)

由式(6)、(8)、(11)可知,在确定的种子理论输送速度 v_s 、带速差比 k 和倾角 θ 下可得到两个夹持带速度及前进速度。

应用 Design-Expert 12 软件进行试验方案设计,以夹持带倾角 θ 、种子理论输送速度 v_s 、带速差比 k 、夹持带间距 h 及喂入半径 r_1 为因素;以投种横卧率 a 、落种横卧率 b 、穴距合格率 d 为指标,以 0.1 m 为理论穴距,开展耦合仿真试验,试验因素编码如表 2

所示。每组试验均走过整个种沟,总时间根据前进速度不同为 20 ~ 70 s,EDEM 时间步长为 2×10^{-5} s,Recurdyn 时间步长为 10^{-3} s。

表 2 仿真试验因素编码

Tab. 2 Factors and codes of simulation test

编码	因素				
	夹持带倾角 $\theta/(^{\circ})$	理论输送速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	带速差比 k	夹持带间距 h/mm	喂入半径 r_1/mm
-1	56. 0	0. 12	0. 1	10	17
0	64. 5	0. 26	1. 0	14	27
1	73. 0	0. 40	1. 9	18	37

仿真结束后,通过 EDEM 后处理导出种沟内种子位置坐标,计算穴距合格率 d ;通过仿真后处理记录种子投种姿态及种沟内落种姿态,计算投种横卧率 a 和落种横卧率 b 。

3.3 试验结果分析

仿真试验过程如图 9 所示,投种时畚头种子经夹持正姿通常呈横卧姿态,姿态调整未完成或在输送过程中与其他种子发生干扰碰撞会造成投种姿态偏转和重播;种子落入种沟后保持横卧姿态或在种沟中翻滚为顺卧姿态。

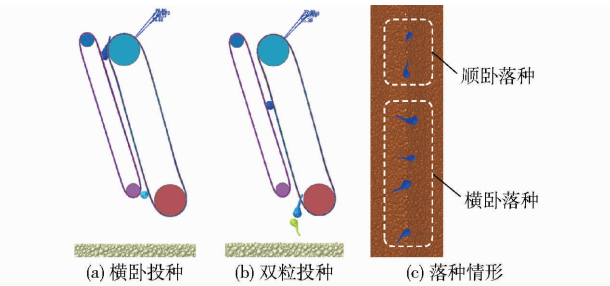


图 9 夹持投种耦合仿真试验

Fig. 9 Clamping and seeding coupling simulation test

试验方案及结果如表 3 所示,对试验结果各项指标分别进行最优拟合,回归模型方差分析如表 4 所示,以尽可能分析潜在的影响因素。由表 4 可知,带速差比 k 对投种横卧率 a 有极显著影响 ($P < 0.01$);夹持带倾角 θ 对穴距合格率 d 有显著影响 ($P < 0.05$);理论输送速度 v_s 及带速差比 k 对穴距合格率 d 有极显著影响 ($P < 0.01$)。此外, k 分别与 θ 和 v_s 的的交互作用对落种横卧率 b 有显著影响 ($P < 0.05$),综合考虑选取夹持带倾角 θ 、理论输送速度 v_s 及带速差比 k 作为影响因素进一步开展优化试验。

4 田间试验

为获得装置最优结构和工作参数,通过搭建田间试验平台对显著性因素开展 Box - Behnken 中心组合试验,通过构建回归拟合模型对参数组合寻优,在最优参数组合下进行田间验证试验。

表 3 仿真试验方案及结果

Tab.3 Simulation test plan and results								
序号	因素					投种横	落种横	穴距
	$\theta/$ ($^{\circ}$)	$v_s/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	k	$h/$ mm	$r_1/$ mm	卧率 $a/\%$	卧率 $b/\%$	合格率 $d/\%$
1	56.0	0.40	1.9	10	37	50.00	42.86	42.11
2	73.0	0.12	0.1	10	37	52.94	47.06	63.64
3	56.0	0.12	0.1	10	17	30.43	60.87	66.67
4	73.0	0.12	1.9	18	17	52.63	47.37	22.22
5	64.5	0.26	1.0	14	27	42.86	42.86	38.10
6	56.0	0.40	1.9	18	17	66.67	66.67	21.05
7	56.0	0.12	0.1	18	17	52.17	47.83	45.45
8	73.0	0.40	0.1	10	17	13.33	6.67	70.59
9	64.5	0.26	1.0	14	27	30.00	30.00	55.00
10	56.0	0.40	0.1	18	37	34.78	65.22	66.67
11	64.5	0.26	1.0	14	27	47.83	60.87	58.33
12	73.0	0.40	1.9	10	17	84.62	53.85	31.58
13	56.0	0.12	1.9	10	37	50.00	12.50	16.67
14	73.0	0.40	0.1	18	37	45.83	33.33	95.45
15	73.0	0.12	1.9	18	37	80.95	52.38	38.10

表 4 仿真试验方差分析

Tab.4 Variance analysis of simulation test					
指标	因素	自由度	平方和	F	P
投种横卧率 a	k	1	2 012.17	9.39	<0.01**
	θ	1	22.70	0.26	0.63
	v_s	1	180.94	2.04	0.20
	k	1	24.17	0.27	0.62
	h	1	149.30	1.68	0.24
落种横卧率 b	θv_s	1	410.07	4.61	0.08
	θk	1	1 166.50	13.12	0.01*
	$v_s k$	1	968.26	10.89	0.02*
	$v_s h$	1	495.45	5.57	0.06
	θ	1	330.33	6.33	0.03*
穴距合格率 d	v_s	1	907.82	17.39	<0.01**
	k	1	5 459.12	104.56	<0.01**
	h	1	0.45	0.01	0.93
	θh	1	793.41	15.20	<0.01**

注：**表示影响极显著($P<0.01$),*表示影响显著($0.01\leq P<0.05$),下同。

4.1 试验条件

田间试验于2024年9月20—24日在华中农业大学校内试验田进行。试验田经旋耕机翻耕整备,采用五点法测得土壤200 mm深处平均土壤坚实度为10.2 kPa,土壤平均含水率为18.47%。柔性带式夹持投种装置田间试验平台如图10所示,其主要由勺夹式排种器、夹持式投种装置、双电机履带底盘等组成,排种器及夹持装置均由交流电机驱动,电机转速可调,采用便携式移动电源供电。勺夹式排种器及双电机履带底盘分别实现藟头种子的夹持取种和试验平台田间牵引功能,双电机履带底盘技术参数

如表5所示。试验前对装置前进速度进行标定,理论穴距为0.1 m,试验选用湖北省崇阳县产大叶藟种,平均含水率为40.52%。

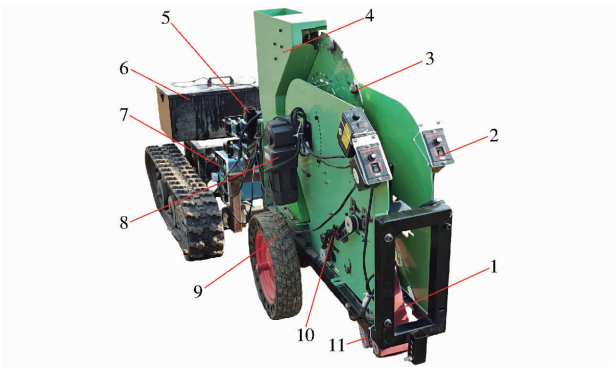


图 10 田间试验平台

Fig.10 Field test platform

1. 上夹持带 2. 控制器 3. 种勺 4. 种箱 5. 仿形机构 6. 双电机履带底盘 7. 便携式移动电源 8. 电机 9. 支撑地轮 10. 同步带 11. 下输送带

表 5 双电机履带底盘技术参数

Tab.5 Main parameters of dual motor tracked chassis	
参数	数值
驱动电机功率/kW	1.5
轨距/m	0.5
接地长度/m	0.55
底盘长×宽×高/($\text{m}\times\text{m}\times\text{m}$)	1.0×0.7×0.3
驱动轮直径/m	0.097
最大前进速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.2
空载质量/kg	150

4.2 试验方法

应用 Design-Expert 12 软件进行 Box – Behnken 试验方案设计,对夹持带倾角 θ 、理论输送速度 v_s 及带速差比 k 开展中心组合试验和验证试验,因素编码如表6所示,试验共开展17组,每组试验前进5 m,前后留有1 m缓冲区。试验指标同仿真试验,穴距合格率 d 进行现场统计测量,投种横卧率 a 和落种横卧率 b 采用实时录像和视频回放的方式统计计算。田间验证试验在最优参数下进行,共重复3次。试验平台经速度标定后采用定速直线行驶模式,田间试验如图11所示。

表 6 因素编码

Tab.6 Coding of factors			
编码	因素		
	夹持带倾角 $\theta/(^{\circ})$	理论输送速度 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	带速差比 k
-1	56.0	0.12	0.1
0	64.5	0.26	1.0
1	73.0	0.40	1.9

4.3 试验结果分析

根据前文分析,每组试验的因素水平经计算可

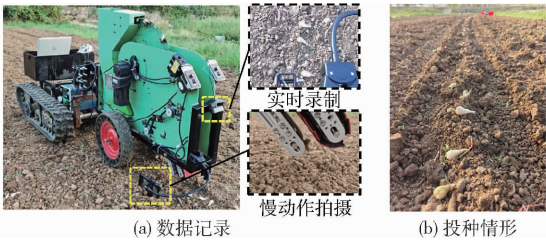


图 11 田间试验

Fig. 11 Field test

得试验装置工作参数,试验方案及结果如表 7 所示,其中 x_1 、 x_2 、 x_3 分别为夹持带倾角、理论输送速度、带速差比编码值。投种过程如图 12 所示,横向对比不同试验的夹持带倾角 θ 由左到右递增,纵向对比带速差比 k 由下到上递增,结合回放及试验结果分析可知,随着带速差比 k 的增加,对正姿效果具有正向影响的趋势,且这种影响在夹持带倾角 θ 为低水平时更加明显。

表 7 Box – Behnken 试验方案与结果

Tab.7 Box – Behnken test protocol and results

序号	因素			$a/\%$	$b/\%$	$d/\%$
	x_1	x_2	x_3			
1	1	0	1	53.02	58.82	81.82
2	0	0	0	60.61	55.75	73.47
3	0	0	0	62.86	66.67	75.56
4	1	-1	0	52.63	59.83	72.34
5	0	0	0	63.16	65.12	72.92
6	1	1	0	48.42	51.30	81.82
7	-1	1	0	56.47	45.68	72.00
8	0	1	1	67.80	54.63	78.26
9	0	0	0	64.86	60.49	79.50
10	-1	0	-1	38.78	53.33	61.22
11	-1	0	1	71.08	55.36	62.07
12	-1	-1	0	62.50	49.09	59.38
13	0	1	-1	40.82	54.61	79.07
14	0	0	0	62.96	51.28	77.19
15	0	-1	-1	42.31	55.56	64.29
16	0	-1	1	64.91	56.98	75.51
17	1	0	-1	39.02	50.82	72.55

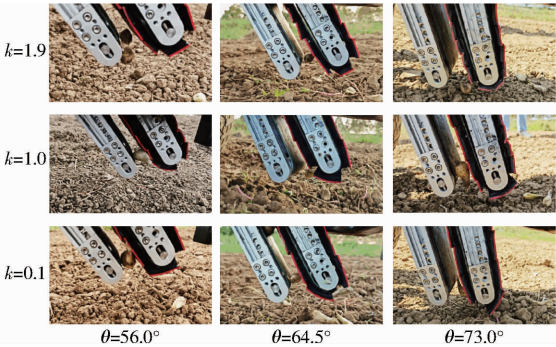


图 12 不同倾角 θ 及带速差比 k 下部分投种情形

Fig. 12 Some cases under different inclination angles θ and ratio k

对试验结果进行回归拟合分析,得到投种横卧率 a 、落种横卧率 b 、穴距合格率 d 的二次回归模型

$$a = 62.89 - 4.47x_1 - 1.11x_2 + 11.99x_3 + 0.45x_1x_2 - 4.58x_1x_3 + 1.09x_2x_3 - 5.68x_1^2 - 2.20x_2^2 - 6.73x_3^2 \quad (13)$$
$$b = 59.86 + 2.16x_1 - 1.90x_2 + 1.43x_3 - 1.28x_1x_2 + 1.50x_1x_3 - 0.35x_2x_3 - 4.62x_1^2 - 3.76x_2^2 - 0.66x_3^2 \quad (14)$$
$$d = 75.73 + 6.73x_1 + 4.95x_2 + 2.57x_3 - 0.79x_1x_2 + 2.10x_1x_3 - 3.01x_2x_3 - 4.61x_1^2 + 0.26x_2^2 - 1.71x_3^2 \quad (15)$$

对回归模型中各项回归系数及各因素分别进行显著性检验和方差分析,结果如表 8 所示。由表 8 可知,投种横卧率 a 回归方程极显著 ($P < 0.01$),且失拟项不显著 ($P > 0.05$),表明二次回归方程可以较好匹配实际值。由 P 值可知, x_1 、 x_3 、 x_1x_3 、 x_1^2 、 x_3^2 对模型具有极显著影响 ($P < 0.01$),投种横卧率 a 的主要影响因素由大到小为:带速差比 k 、夹持带倾角 θ 、理论输送速度 v_s 。

由表 8 可知,穴距合格率 d 回归方程极显著 ($P < 0.01$),且失拟项不显著 ($P > 0.05$),表明二次回归方程可以较好匹配实际值。由 P 值可知, x_1 、 x_2 对模型有极显著影响 ($P < 0.01$), x_3 、 x_2x_3 、 x_1^2 对模型具有显著影响 ($P < 0.05$),穴距合格率 d 的主要影响因素由大到小为:夹持带倾角 θ 、理论输送速度 v_s 、带速差比 k 。由表 8 可知,落种横卧率 b 回归方程不显著 ($P > 0.05$),失拟项不显著 ($P > 0.05$),表明虽无失拟因素存在,但方程预测值难以较好地匹配实际值,故在后续最优参数组合中不对落种横卧率 b 设立目标方程。

为直观分析试验因素与指标之间的关系,绘制响应曲面,其中夹持带倾角 θ 、带速差比 k 与投种横卧率 a 之间,理论输送速度 v_s 、带速差比 k 与穴距合格率 d 之间的响应曲面如图 13、14 所示。由图 13 可知,在带间距为 14 mm、喂入半径为 27 mm、理论输送速度为 0.26 m/s 且带速差比为低水平时,投种横卧率随着夹持带倾角的增大先增大后减小;当带速差比处于高水平时,投种横卧率随着夹持带倾角的增大而减小;而在固定的夹持带倾角下,投种横卧率随着带速差比的增大而增大,与试验过程及结果的直观分析相符。由等高曲线可知,夹持带倾角为 $56^\circ \sim 66^\circ$ 、带速差比为 1.4 ~ 1.9 时,投种横卧率存在最大值。

由图 14 可知,当夹持带倾角为 64.5° 、理论输送速度为低水平时,穴距合格率随着带速差比的增

表 8 Box – Behnken 试验方差分析

Tab.8 ANOVA of Box – Behnken test					
项目	变异来源	平方和	自由度	F	P
投种横卧率 a	模型	1 788. 22	9	50. 66	<0. 000 1 **
	x_1	159. 61	1	40. 69	0. 000 4 **
	x_2	9. 78	1	2. 49	0. 16
	x_3	1 149. 35	1	293. 02	<0. 000 1 **
	$x_1 x_2$	0. 83	1	0. 21	0. 66
	$x_1 x_3$	83. 84	1	21. 38	0. 002 4 **
	$x_2 x_3$	4. 79	1	1. 22	0. 31
	x_1^2	135. 99	1	34. 67	0. 000 6 **
	x_2^2	20. 40	1	5. 20	0. 06
	x_3^2	190. 74	1	48. 63	0. 000 2 **
	残差	27. 46	7		
	失拟	18. 26	3	2. 65	0. 19
	总和	1 815. 68	16		
落种横卧率 b	模型	262. 01	9	0. 96	0. 54
	x_1	37. 48	1	1. 23	0. 30
	x_2	29. 01	1	0. 95	0. 36
	x_3	16. 45	1	0. 54	0. 49
	$x_1 x_2$	6. 54	1	0. 21	0. 66
	$x_1 x_3$	8. 94	1	0. 29	0. 60
	$x_2 x_3$	0. 49	1	0. 02	0. 90
	x_1^2	89. 96	1	2. 96	0. 13
	x_2^2	59. 65	1	1. 96	0. 20
	x_3^2	1. 81	1	0. 06	0. 81
	残差	213. 04	7		
	失拟	48. 22	3	0. 39	0. 77
	总和	475. 05	16		
穴距合格率 d	模型	773. 37	9	14. 81	0. 000 9 **
	x_1	362. 61	1	62. 50	<0. 000 1 **
	x_2	196. 32	1	33. 84	0. 000 7 **
	x_3	52. 69	1	9. 08	0. 02 *
	$x_1 x_2$	2. 46	1	0. 42	0. 54
	$x_1 x_3$	17. 72	1	3. 06	0. 12
	$x_2 x_3$	36. 18	1	6. 24	0. 04 *
	x_1^2	89. 30	1	15. 39	0. 01 *
	x_2^2	0. 29	1	0. 05	0. 83
	x_3^2	12. 28	1	2. 12	0. 19
	残差	40. 61	7		
	失拟	11. 23	3	0. 51	0. 70
	总和	813. 98	16		

大而增大;理论输送速度为高水平时,穴距合格率随着带速差比的增大呈先增大后减小的趋势;而在固定的带速差比下,穴距合格率随理论输送速度的增大而增大。由等高曲线可知,理论输送速度为 0. 36 ~ 0. 40 m/s、带速差比为 1. 0 ~ 1. 9 时,穴距合格率存在最大值。

4. 4 参数优化及试验验证

以投种横卧率 a 和穴距合格率 d 最大为目标,目标函数与约束条件为

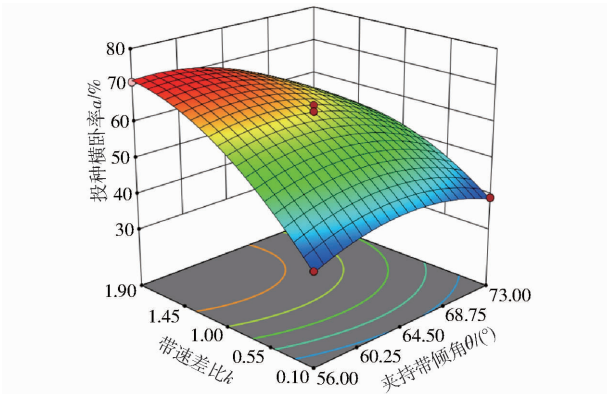


图 13 夹持带倾角和带速差比对投种横卧率影响的响应曲面

Fig. 13 Response surface for influence of clamp belt angle and belt speed differential ratio on horizontal discharging rate

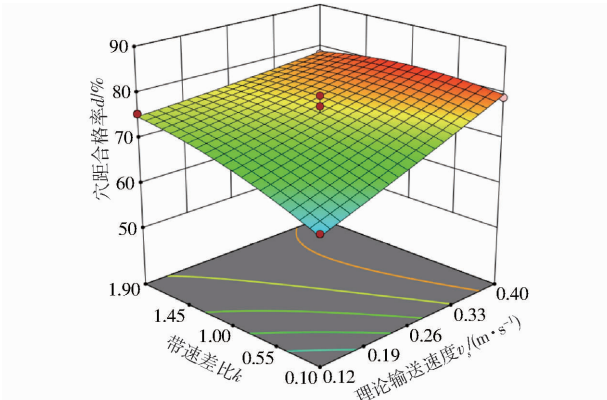


图 14 理论输送速度和带速差比对穴距合格率影响的响应曲面

Fig. 14 Response surface for influence of theoretical velocity of discharging and belt speed differential ratio on qualified rate of hole distance

$$\begin{cases} \max a \\ \max d \\ \text{s. t. } \begin{cases} 56^{\circ} \leq \theta \leq 73^{\circ} \\ 0.12 \text{ m/s} \leq v_s \leq 0.40 \text{ m/s} \\ 0.1 \leq k \leq 1.9 \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

经优化求解得到夹持带倾角 $\theta = 65^{\circ}$,理论输送速度 $v_s = 0.38 \text{ m/s}$,带速差比 $k = 1.64$ 时,投种装置性能最优,投种横卧率为 65.28%,穴距合格率为 80.04%。为验证参数的可靠性,在最优参数下进行 3 次田间验证试验,具体参数及结果如表 9 所示。

表 9 验证试验方案与结果

Tab.9 Verificaiton test plan and results				
$\theta/(^{\circ})$	$v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	k	$a/\%$	$d/\%$
65	0.38	1.64	60.00	80.00
			61.86	77.27
			61.46	79.39
平均值			61.11	78.89

由表 9 可知,试验平均投种横卧率为 61.11%,平均穴距合格率为 78.89%,与回归模型最优结果分别相差 4.17、1.15 个百分点,验证了回归方程的准确性。

结合田间试验过程可知,优化后的夹持式投种装置能够在田间环境中对上级勺夹式排种器分离的蒜头种子实现进一步的导向、正姿和投种,作业效果符合 NY/T 503—2015《单粒(精密)播种机作业质量》要求,投种横卧率在 60% 以上,在一定程度实现了蒜种横卧种植的农艺要求。

4.5 讨论

本文增设柔性带式夹持投种装置后穴距合格率为 78.89%,较前期勺夹式排种器的田间排种试验穴距合格率 63.10% 有所提升^[4],但考虑蒜头种子在脱离装置后落地的瞬间仍会发生姿态变化,故基于多级播种思路,后续需针对正姿投种后的蒜头种子进行高效栽植,并对种子与土壤间的碰撞弹跳开展研究。此外,蒜头种子尺寸形状变化较大,与人工种植相比,机械化种植需要对蒜种进行分级、筛选等

处理,以提高蒜种一致性,提升播种质量。

5 结论

(1)设计了一种双柔性带式夹持投种装置,其主要由喂入挡板、电机、同步带轮、夹持带等组成。对装置正姿输送原理进行了分析,以此为基础开展了关键结构和参数设计,并基于耦合仿真试验,得到影响装置性能的主要因素为:夹持带倾角 θ 、理论输送速度 v_s 、带速差比 k 。

(2)通过田间试验建立了以投种横卧率和穴距合格率为目标的多元回归模型,对夹持带倾角 θ 、理论输送速度 v_s 、带速差比 k 进行参数优化,最优参数组合为:夹持带倾角 $\theta = 65^\circ$,理论输送速度 $v_s = 0.38\text{ m/s}$,带速差比 $k = 1.64$,此时,平均投种横卧率为 61.11%,平均穴距合格率为 78.89%。

(3)该装置可有效实现低位投种,并对投种姿态进行矫正约束,投种横卧率、穴距合格率等工作性能基本符合作业要求。

参 考 文 献

[1] 吴琦. 蒜头有效成分的提取及生物活性研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2018.
WU Qi. Study on extraction and biological activity of *Allium chinense* active ingredients[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018. (in Chinese)

[2] 张可祯,张燕书,朱启才. 蒜头标准化生产与加工技术[M]. 北京:化学工业出版社,2020.

[3] 陈学军,程和生,万新建,等. 绿色食品蒜头栽培技术规程[J]. 江西农业学报,2009,21(8):97-98.
CHEN Xuejun, CHENG Hesheng, WAN Xinjian, et al. Cultivation technology regulation of green food crop *Allium chinensis* [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(8): 97-98. (in Chinese)

[4] 康启新,张国忠,郑侃,等. 勺夹式蒜头排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(5):15-25.
KANG Qixin, ZHANG Guozhong, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of the spoon clip type seed metering device for *Allium chinense*[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(5): 15-25. (in Chinese)

[5] 李玉华,刘全程,李天华,等. 基于 Jetson Nano 处理器的大蒜鳞芽朝向调整装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021, 37(7):35-42.
LI Yuhua, LIU Quancheng, LI Tianhua, et al. Design and experiments of garlic bulbil orientation adjustment device using Jetson Nano processor[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7):35-42. (in Chinese)

[6] 王应彪,赵学观,徐丽明,等. 基于电磁振动的玉米种子定向排序输送技术[J]. 农业机械学报,2015,46(1):79-88.
WANG Yingbiao, ZHAO Xueguan, XU Liming, et al. Experiment and directional movement technology of corn seed based on electromagnetic vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 79-88. (in Chinese)

[7] 赖庆辉,马文鹏,刘素,等. 气吸圆盘式微型薯排种器充种性能模拟与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(5):44-53.
LAI Qinghui, MA Wenpeng, LIU Su, et al. Simulation and experiment on seed-filling performance of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 44-53. (in Chinese)

[8] 郑娟,廖彦涛,廖庆喜,等. 播种机排种技术研究态势分析与趋势展望[J]. 农业工程学报,2022,38(24):1-13.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Trend analysis and prospects of seed metering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(24): 1-13. (in Chinese)

[9] 崔永杰,王明辉. 农业领域自动定向技术研究进展分析[J]. 农业机械学报,2023,54(4):1-20.
CUI Yongjie, WANG Minghui. Research progress analysis of auto-orientation technologies in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 1-20. (in Chinese)

[10] HAYDEN C W, BOWERS S A. Emergence and yield of beans planted with a seed-orienting planter[J]. Agronomy Journal, 1974, 66(1): 50-52.

[11] 马伟童. 用于翻转调向的大蒜连续式立直种植装置的研究[D]. 淄博:山东理工大学,2019.
MA Weitong. Study on continuous vertical planting device of garlic with flip direction[D]. Zibo: Shandong University of

- Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] 程振,宋井玲,徐洪岑,等. 基于机器视觉的蒜种智能定向技术综述[J]. 智能化农业装备学报(中英文),2023,4(2): 63–70.
CHENG Zhen, SONG Jingling, XU Hongcen, et al. Overview of intelligent orientation technology of garlic seed based on machine vision[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(2): 63–70. (in Chinese)
- [13] LI Yuhua, WU Yanqiang, LI Tianhua, et al. Design and experiment of adjustment device based on machine vision for garlic clove direction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105513.
- [14] 信嘉程. 基于视觉识别的大蒜正芽机构设计与试验研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2023.
XIN Jiacheng. Design and experimental study of positive bud garlic mechanism based on visual recognition[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023. (in Chinese)
- [15] 麻芳兰,刘天翔,李尚平,等. 预切种式甘蔗横向排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(7):72–81.
MA Fanglan, LIU Tianxiang, LI Shangping, et al. Design and test of transverse transplanter for pre-cut sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 72–81. (in Chinese)
- [16] 牟向伟,陈林涛,马旭,等. 预切种振动供种式木薯播种器勺链排种机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2): 20–31.
MOU Xiangwei, CHEN Lintao, MA Xu, et al. Design and experiment of spoon chain seed metering mechanism of precutting vibration seed feeding cassava planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 20–31. (in Chinese)
- [17] 温宝琴,宋鹏翔,李景彬,等. 带勺式马铃薯排种器漏播检测与补种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2): 36–46.
WEN Baoqin, SONG Pengxiang, LI Jingbin, et al. Design and test of seeding monitoring and compensating system for belt-spoon type potato seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 36–46. (in Chinese)
- [18] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报,2020,51(12):1–14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Analysis of research progress on seed guiding technology and devices of seeding machines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1–14. (in Chinese)
- [19] 康启新,张国忠,郑侃,等. 施力方向与加载速率对藁头种子力学特性的影响[J]. 华中农业大学学报,2021,40(4): 231–238.
KANG Qixin, ZHANG Guozhong, ZHENG Kan, et al. Effects of force direction and loading speed on seed mechanical properties of *Allium chinense*[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(4): 231–238. (in Chinese)
- [20] 高彩云. 纯滚动刚体的运动分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版),2010,26(5):32–33,57.
GAO Caiyun. An analysis of the movement of pure rolling rigid body[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2010, 26(5): 32–33, 57. (in Chinese)
- [21] 刘向东,王学农,王春耀,等. 鲜杏单体排序间隔输送装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(12):31–38.
LIU Xiangdong, WANG Xuenong, WANG Chunyao, et al. Design and test on transmitting device for fresh apricot with single fruit rank in certain interval[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 31–38. (in Chinese)
- [22] 耿爱军,栗晓宇,侯加林,等. 自动定向大蒜播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(11):17–25.
GENG Aijun, LI Xiaoyu, HOU Jialin, et al. Design and experiment of automatic directing garlic planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 17–25. (in Chinese)
- [23] 刘婉茹,张国忠,刘浩蓬,等. 多子芋收获机离心回转式根土分离装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(20):1–13.
LIU Wanru, ZHANG Guozhong, LIU Haopeng, et al. Design and experiment of centrifugal rotary root-soil separation device for multiple taro harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(20): 1–13. (in Chinese)
- [24] 杨清华. 大蒜种植机直种植装置性能仿真分析与试验研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
YANG Qinghua. Simulation analysis and experimental study on performance of garlic planter vertical planter[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [25] 文恩杨,李玉华,牛子儒,等. 蒜种颗粒离散元模型参数标定[J]. 农机化研究,2021,43(5):160–167.
WEN Enyang, LI Yuhua, NIU Ziru, et al. Parameters calibration of discrete element model for garlic particles[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 160–167. (in Chinese)
- [26] 姜凯,陈立平,张骞,等. 蔬菜嫁接机器人柔性夹持搬运机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):63–71.
JIANG Kai, CHEN Liping, ZHANG Qian, et al. Design and experiment on flexible clamping and conveying mechanism of vegetable grafting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 63–71. (in Chinese)