

多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器设计与试验

侯加林^{1,2} 方立志^{1,2} 张海阔¹ 周凯^{1,2} 李天华^{1,2} 李玉华^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对勺链式大蒜播种机取种过程中常出现的漏种、重种问题,设计了一种多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器。取种勺在充种阶段获取多粒蒜种,经多重扰动清种,最终取种勺内仅余1粒蒜种。本文以金乡蒜种为研究对象,阐述了排种器的工作原理,确定了排种器的各项参数和多重扰动装置的最佳安装位置。通过DEM-MBD耦合仿真试验,分析了倾斜角、取种勺线速度对充种成功率的影响,以及凹槽形状对单粒取种率的影响。运用Box-Behnken中心组合试验方法,以第2弧形突出部分坡度、倾斜角、取种勺线速度为试验因素,以单粒取种率和漏种率作为评价指标,开展了三因素三水平正交试验。利用Design-Expert 8.0.6数据分析软件,分析了各因素对单粒取种率与漏种率的影响,对试验因素进行优化,确定了多重扰动装置最佳结构参数。设计试验台对仿真结果进行验证,倾斜角、取种勺线速度分别为15°、0.07 m/s的条件下,通过调节多重扰动装置与取种勺凹槽顶端距离适配不同级别蒜种,当Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级蒜种距离分别为0、6.1、12.1 mm时,单粒取种成功率分别为92.2%、97.2%、95.6%,具有良好的取种性能。

关键词: 大蒜播种机; 多重扰动; 单粒取种; 排种器; DEM-MBD

中图分类号: S223.2*5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)01-0065-11

OSID:



Design and Experiment of Multi-disturbance Cleaning and Single-seed Sowing Device for Garlic

HOU Jialin^{1,2} FANG Lizhi^{1,2} ZHANG Haikuo¹ ZHOU Kai^{1,2} LI Tianhua^{1,2} LI Yuhua^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China)

Abstract: In response to the common issues of seed leakage and reseeding during the seed-picking process of a spoon-chain garlic seeder, a novel multi-disturbance cleaning and single-seed sowing device was designed. The sowing device collected multiple garlic seeds during the seed-picking process and underwent multiple disturbances to ensure that only one seed remains in the sowing spoon. Focusing on Jinxiang garlic seeds and elucidating the working principle of the sowing device, the optimal parameters of the sowing device and the installation position of multi-disturbance device were determined. Through DEM-MBD coupled simulation experiments, the influence of tilt angle and scoop speed on the success rate of seed filling and the impact of groove shape on the single-seed extraction rate were analyzed. A three-factor three-level orthogonal experiment was performed by using the Box-Behnken central composite design method, with the slope of the second arc-shaped prominent part, inclination angle, and spoon linear speed as experimental factors, and the single-seed qualification rate and seed leakage rate as evaluation criteria. Design-Expert 8.0.6 data analysis software was employed to analyze the effects of each factor on the single-seed sowing rate and seed leakage rate and optimize the experimental factors to determine the optimal structural parameters of the multi-disturbance device. A validation experiment was conducted using a test rig to verify the simulation results. Under the conditions of an inclination angle of

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-08-21

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-24-D-01)、山东省现代农业产业技术体系蔬菜产业创新团队项目(SDAIT-05-11)和中国博士后科学基金面上项目(2019M662410)

作者简介: 侯加林(1963—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: jlh@sdau.edu.cn

通信作者: 李玉华(1983—),男,副教授,博士,主要从事特色经济作物装备研究,E-mail: liyuhua@sdau.edu.cn

15° and a spoon linear speed of 0.07 m/s, the multi-disturbance device was adjusted to adapt to different levels of garlic seeds by adjusting the distance between the device and the top of the sowing spoon groove. The success rates of single-seed sowing were 92.2% , 97.2% , and 95.6% for Grade I , Grade II , and Grade III garlic seeds, respectively, demonstrating excellent sowing performance.

Key words: garlic planter; multiple disturbances; single-seed sowing; seeder; DEM – MBD

0 引言

中国大蒜种植面积位居世界首位^[1]。然而,目前大蒜种植主要依赖人工方式,其劳动强度大、成本高且生产效率低^[2-3]。蒜种属于中大粒种子,其形状和尺寸存在较大的变异系数。目前大蒜种植机械取种方式主要采用窝眼式、夹持式和勺链式等方法^[4],普遍存在漏种和重种的问题,制约了大蒜机械化播种的发展^[5-6]。

近年来,国内外学者在大蒜机械化播种方面进行了一系列研究。谢东波等^[7]设计了一种扰种齿辅助气吸式大蒜排种器,通过扰种齿的辅助气吸实现大蒜的单粒取种。栗晓宇等^[8]、耿爱军等^[9]设计了一种利用蒜种盒播种大蒜的播种机,但需要人工将蒜种放置于种盒中,自动化程度较低。张春岭等^[10]设计了一种电液混合调控式大蒜播种机,通过电控系统控制播种过程,在漏播时进行报警,但仍需要人工进行补种操作。YANG 等^[11]采用勺带式取种方式,降低了重种率,但未解决漏种问题。BAKHTIARI 等^[12]设计了一种精密大蒜播种机,作业效果较好,但成本较高。李玉华等^[13]设计了一种轮勺式大蒜单粒取种装置,利用取种勺与取种轮形成的空腔进行单粒取种,但取种效率较低。侯加林等^[14]设计了一种双充种室大蒜单粒取种装置,通过协调一二级取种勺速度来实现单粒取种,取种效果较好,但结构复杂,难以适应复杂的田间环境。李天华等^[15]设计了一种勺链式大蒜播种机漏取种检测与补种装置,通过脉冲宽度判断是否漏种,并通过补种装置进行补种,但系统成本较高,难以大规模推广。勺链式取种是大蒜等中大粒种子机械化取种的主要方式之一^[16-19],但目前大蒜播种机勺式排种器的单粒取种率普遍较低,无法满足蒜农的需求,因此需要对其结构进行优化和改进。

本文以金乡蒜种为研究对象,针对勺链式大蒜播种机存在的漏种与重种问题,设计一种多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器,并在试验台上进行试验验证。该装置在充种阶段通过多重扰动清种,首先获取多粒蒜种,然后逐步清除多余的蒜种,最终使取种勺内仅保留 1 粒蒜种。以期解决勺链式大蒜播种机漏种和重种等问题。

1 排种器结构与工作原理

1.1 排种器结构

多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器主要由变限位取种勺、链条、多重扰动装置、种箱、传动轴和链轮等部件组成,具体结构如图 1 所示。多重扰动装置安装在种箱内壁,由 3 块扰动板构成。每个扰动板上设有 3 个坡度不同的弧形突出部分,中间扰动板弧形突出部分略低于两侧扰动板。变限位取种勺与扰动板相互配合,形成一个圆台状的容种空间。容种空间容积可变,在进行播种之前,可通过调节安装位置来适应不同级别蒜种的单粒取种工作。

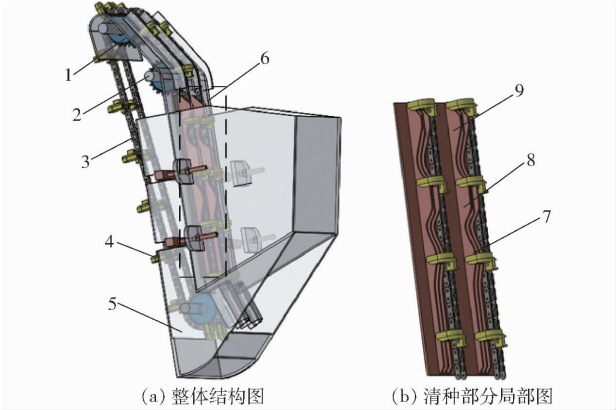


图 1 排种器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of seed metering device structure

1.链轮 2.传动轴 3.链条 4.变限位取种勺 5.种箱 6.多重扰动装置 7.第 1 弧形突出部分 8.第 2 弧形突出部分 9.第 3 弧形突出部分

1.2 排种器工作原理

排种器的工作过程分为充种和清种两个阶段,具体流程如图 2 所示。工作过程中,根据蒜种级别对多重扰动装置的安装位置进行调整。链条驱动变限位取种勺开始运动,此时多粒蒜种在重力、种勺内壁支持力和取种勺支持力的共同作用下填充到变限位取种勺中,完成充种阶段。清种阶段分为 3 个环节:①取种勺经过相对平缓的第 1 弧形突出部分进行第 1 次清种。在弧形突出部分和蒜种的相互作用下,部分多余的蒜种被清除出取种勺。②取种勺经过多重扰动装置的第 2 弧形突出部分进行第 2 次清种。由于第 2 弧形突出部分的高度和坡度均高于第 1 弧形突出部分,未被清除的多余蒜种继续被清除

出取种勺。③为了确保取种勺内没有多余的蒜种，取种勺在经过第 3 弧形突出部分时进行第 3 次清种，直到勺内只剩余 1 粒蒜种，清种阶段完成。

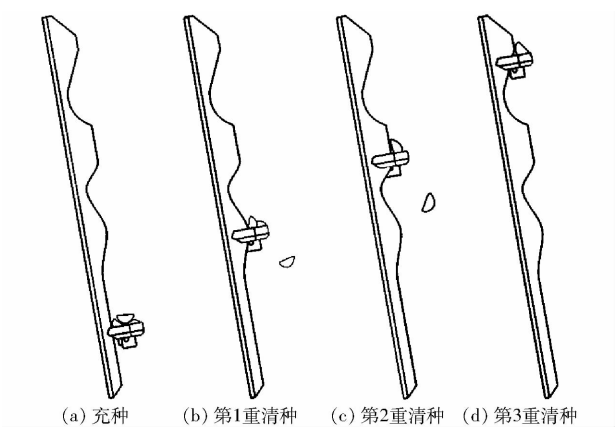


图 2 排种器工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of seed metering device

2 关键部件设计分析

2.1 金乡蒜种参数测定与受力分析

2.1.1 蒜种基本参数

变限位取种勺容量由目标蒜种确定，随机选取山东省金乡县蒜种 600 粒，以厚度为标准分为 3 级^[20]，结果如表 1 所示。

表 1 金乡蒜种尺寸区间
Tab. 1 Size range of Jinxiang garlic

等级	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm
I	26 ~ 30	13. 4 ~ 20. 2	13. 5 ~ 17. 5
II	30 ~ 33. 5	15. 8 ~ 22. 5	17. 5 ~ 21. 5
III	33. 5 ~ 37	19 ~ 25. 6	21. 5 ~ 25. 5

2.1.2 充种过程受力分析

取种勺从种箱中获取蒜种的过程称为充种。充种过程中，蒜种受到多种作用力，其中对蒜种影响较大的有自身重力 G 、蒜种间的摩擦力 F_m ，以及充种时取种装置对蒜种的支撑力 F_s 。将这些力在三维空间中的受力情况投影到二维平面，具体的受力情况如图 3 所示。

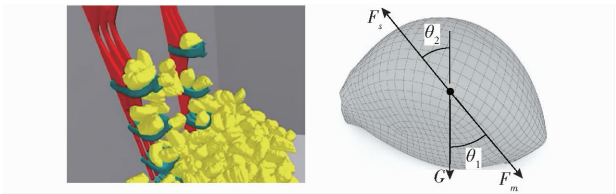


图 3 充种过程受力分析

Fig. 3 Force analysis during seed filling process

不同作用力之间的平衡关系满足

$$\begin{cases} G + F_m \cos \theta_1 = F_s \cos \theta_2 \\ F_m \sin \theta_1 = F_s \sin \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ_1 ——支撑力方向角，($^\circ$)

θ_2 ——摩擦力方向角，($^\circ$)

充种时，取种装置与蒜种相互接触，在这个过程中，蒜种需克服重力和蒜种种群间的摩擦力，从而脱离种群，被取种装置获取。为克服重力及摩擦力，取种装置需产生如图 3 所示斜向上的作用力 F_s 。为了最大限度地保证充种过程中蒜种的稳定状态及充种成功率，取种装置设计为边缘倾斜向上的勺状结构，下文简称为取种勺。

2.2 变限位取种勺设计

2.2.1 功能及结构设计

变限位取种勺的设计直接影响充种效果。为了提高取种成功率并降低漏种率，在充种过程中，变限位取种勺首先获取多粒蒜种，通过逐步清种最终实现单粒取种。根据大蒜的形态学结构特点，设计变限位取种勺如图 4 所示。该取种勺具有一个容积可变的容种空间，在充种时可容纳 2 ~ 3 粒蒜种。随后，取种勺随着链条的上升，经过变限位取种装置时，取种勺内部的容种空间减小，从而将取种勺外侧的蒜种清除，实现单粒取种。为实现这一功能，依照蒜种尺寸，在取种勺上设置 3 道凹槽。其中，两侧的凹槽略高于中间的凹槽。当多重扰动装置插入时，形成一个圆台状的容种空间，从而提高取种的成功率并降低漏种率。为达到最佳的操作效果，需要对取种勺的极限容种空间进行合理设计。

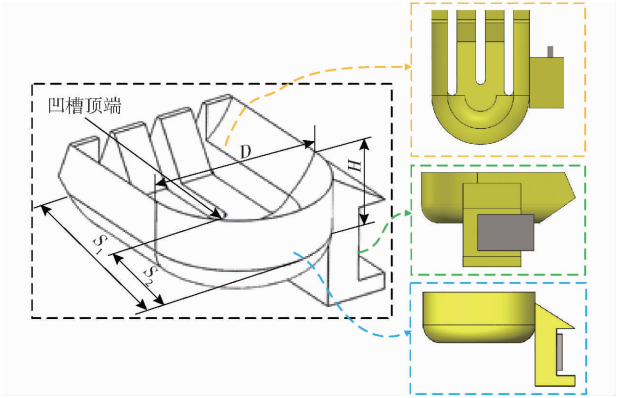


图 4 变限位取种勺结构示意图

Fig. 4 Schematic of seeding spoon structure with changing limit position

2.2.2 最小容种空间

多重扰动装置与取种勺凹槽顶端距离为 0 mm 时，容种空间达到最小值，即取种勺的最小容种空间。为了避免取种勺清种后仍存在重播现象，需对最小容种空间进行设计。设计目标是多重扰动装置与取种勺凹槽顶端距离为 0 mm 时，仅容纳 1 粒 I 级蒜种。蒜种在取种勺内主要存在横躺、竖躺、斜躺和竖直 4 种形态，其中横躺形态作为主要尺寸设计依

据^[21]。在这种情况下,为了避免容纳 2 粒竖直蒜种,取种勺宽度 D 应小于 I 级蒜种最小宽度 $W_{1\min}$ 的 2 倍;为确保蒜种的重心在取种勺内并减少竖直形态的出现概率,取种勺深度 H 应大于 I 级蒜种最大宽度 $W_{1\max}$ 的一半,小于最小长度 $L_{1\min}$ 的一半;取种勺最小容种空间长度 S_2 应大于 I 级蒜种的最大厚度 $T_{1\max}$,小于 I 级蒜种最小厚度 $T_{1\min}$ 的 2 倍。为确保单粒Ⅲ级蒜种重心在取种勺内,取种勺宽度 D 应大于Ⅲ级蒜种最大长度 $L_{3\max}$ 的一半,取种勺深度 H 应大于Ⅲ级蒜种最大宽度 $W_{3\max}$ 的一半。综合上述条件,最终取种勺结构尺寸参数应满足

$$\begin{cases} \frac{L_{3\max}}{2} \leq D \leq 2W_{1\min} \\ \frac{W_{3\max}}{2} \leq H \leq \frac{L_{1\min}}{2} \\ T_{1\max} \leq S_2 \leq 2T_{1\min} \end{cases} \quad (2)$$

经计算,取种勺最小容种空间长度 S_2 取参数范围的中值 22.2 mm,取种勺宽度 D 取参数范围的中值 22.7 mm,取种勺深度 H 取参数范围的中值 12.9 mm。

2.2.3 最大容种空间

在充种阶段,取种勺容种空间达到最大,即取种空间长度为极限值 S_1 ,如图 4 所示。为了确保最大容种空间能够容纳 2 粒以上横躺的Ⅲ级蒜种, S_1 应满足

$$S_1 \geq 2T_{3\max} \quad (3)$$

为了避免过多地取 I 级蒜种,取种勺最大容种空间长度 S_1 取可行范围内的最小值,即 51 mm。

2.2.4 取种勺凹槽设计

变限位取种勺的凹槽间隔对多余蒜种的清种效果有影响。如果凹槽间隔过大,蒜种会卡在多重扰动板的中间,导致重种率增加并对蒜种造成损伤。如果凹槽间隔过小,则最小容种空间会变小,从而增加漏种率。

图 5 展示了蒜种落入取种勺时的剖面图。为了提高蒜种在种勺内的稳定性,最佳的取种勺结构是使蒜种两端和底部与取种勺接触。将其最大高度定义为取种勺宽度 D 。如图 5 所示,通过对多粒蒜种的拱背进行测量并绘制误差棒图,基于均值拟合获得了蒜种拱背的平均曲线方程

$$y = -0.048x^2 + 1.089x \quad (4)$$

式中 x ——蒜种拱背高度,mm

y ——蒜种拱背宽度,mm

取种勺凹槽如图 6 所示,为了确保两侧扰动板的有效功能、延长其使用寿命,并同时降低蒜种损伤,应满足:取种勺凹槽宽度 A 、凹槽间隔 B 和取种

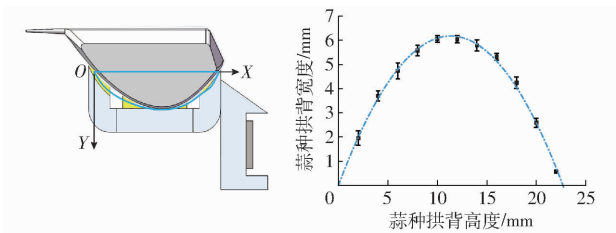


图 5 取种过程截面图和蒜种拱背平均曲线

Fig.5 Sectional view of seeding process and average curve of garlic arch back

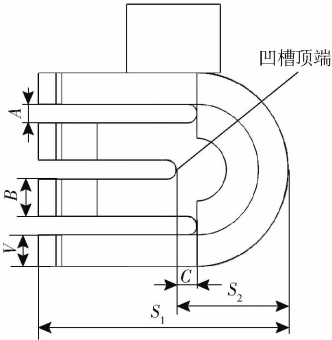


图 6 取种勺容种空间示意图

Fig.6 Schematic of spoon groove

勺侧壁宽度 V 均应不小于 2 mm;凹槽顶端的分布应与蒜种拱背的平均曲线相吻合。取种勺凹槽宽度 A 、凹槽间隔 B 、凹槽长度差 C 、取种勺宽度 D 以及侧壁宽度 V 之间的关系式为

$$\begin{cases} 2B + 3A = D - 2V \\ C = 6.17 + 0.048(11.325 - A - B)^2 - 1.089(11.325 - A - B) \\ (A > 2 \text{ mm}, B > 2 \text{ mm}, V > 2 \text{ mm}) \end{cases} \quad (5)$$

2.3 多重扰动装置设计

2.3.1 清种过程受力分析

根据装置设计,取种勺在充种后可获取 2~3 粒蒜种,以较为复杂的 3 粒蒜种进行分析。在清种过程中,最内侧的蒜种首先接触到扰动装置。以当前接触扰动装置的蒜种为研究对象进行受力分析。除前文分析的作用力(蒜种自身重力 G 、蒜种种群之间摩擦力 F_m 、取种装置对蒜种的支撑力 F_s)外,该蒜种还受到种群间的挤压力 F_c 和扰动装置推力 F_p 的影响。将三维空间中的受力情况映射到二维平面,具体的受力情况如图 7 所示。

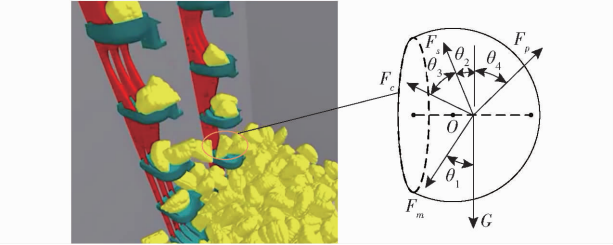


图 7 清种过程受力分析

Fig.7 Force analysis during seed cleaning process

为实现清种功能, 竖直方向及水平方向的作用力需满足蒜种的启动条件, 具体的作用关系式为

$$\begin{cases} F_s \cos \theta_2 + F_c \cos \theta_3 + F_p \cos \theta_4 \geq G + F_m \cos \theta_1 \\ F_p \sin \theta_4 \geq F_m \sin \theta_1 + F_s \sin \theta_2 + F_c \sin \theta_3 \end{cases} \quad (6)$$

式中 θ_3 ——种群间挤压力方向角, ($^\circ$)

θ_4 ——扰动装置推力方向角, ($^\circ$)

根据装置设计, 取种勺远离扰动装置的一侧称为外侧, 最外侧的蒜种在扰动后最先脱离取种勺。以水平方向的运动为例, 以最外侧的蒜种为研究对象进行受力分析。该蒜种受到与接触蒜种相关的推力 F_p 的作用, 具体的受力情况和运动情况如图 8 所示。

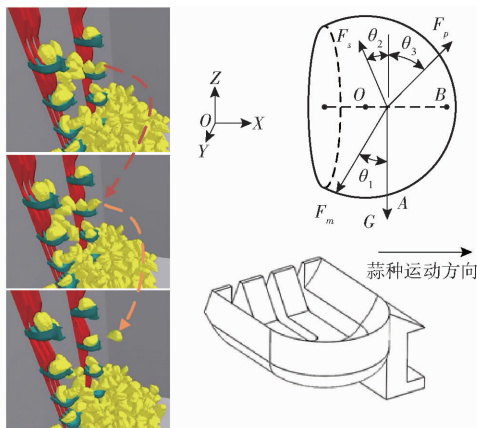


图 8 水平运动过程受力分析

Fig. 8 Force analysis of horizontal motion process

为实现清种功能, 扰动装置作用后, 竖直方向和水平方向的作用力至少一个需满足蒜种的启动条件, 以水平运动为例, 具体的作用关系式为

$$\begin{cases} F_s \cos \theta_2 + F_p \cos \theta_3 = G + F_m \cos \theta_1 \\ F_p \sin \theta_3 \geq F_m \sin \theta_1 + F_s \sin \theta_2 \end{cases} \quad (7)$$

2.3.2 扰动板设计

多重扰动装置是实现单粒取种的关键部件, 其设计目标是实现清种功能并同时最大限度降低对蒜种的损伤, 该装置的设计依据是蒜种的形态学结构^[20]。如图 9 所示, 多重扰动装置由 3 块扰动板组成, 其中两侧扰动板的弧形凸出部分略高于中间扰动板, 具体高度差由仿真试验确定, 该设计可有效减少蒜种的损伤。扰动板上分布着不同幅度的弧形突出部分, 蒜种上升时, 依次经过这些弧形突出部分, 从而实现清种的功能。多重扰动板长度 L_0 由种勺长度 S_1 与最小容种空间长度 S_2 的差值确定, 经计算 L_0 为 28.8 mm。

多重扰动装置的弧形突出部分是影响清种效果的关键要素。为保证清种效果, 在设计时采用 3 重扰动清种策略。具体而言, 第 1 弧形突出部分用于初步清种, 具有较为平缓的斜坡; 第 2 弧形突出部分

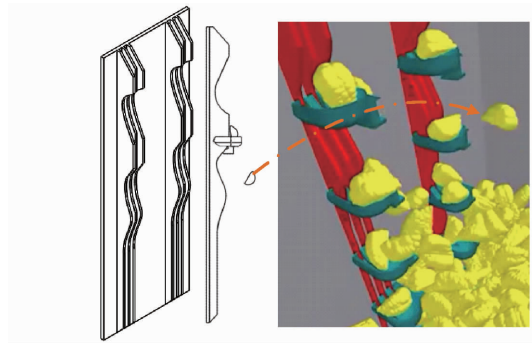


图 9 多重扰动装置结构图

Fig. 9 Multiple disturbance device structure diagram

承担主要的清种工作; 第 3 弧形突出部分作为第 2 弧形突出部分清种工作的补充, 以避免重种现象的发生。弧形突出部分坡度决定了清种频率和清种力度, 坡度过大容易导致漏种, 而坡度过小则容易导致重种。弧形突出部分坡度计算式为

$$I = \frac{h}{l} \times 100\% \quad (8)$$

图 10 以中间扰动板为例, 其垂直高度 h 与中间多重扰动板的长度 L_0 相同, 因此扰动装置的坡度 I 由水平距离 l 确定。第 2 弧形突出部分承担主要清种任务, 设计时需要首先考虑, 第 1 弧形突出部分和第 3 弧形突出部分的设计以第 2 弧形突出部分为参考。根据前期试验的结果, 第 2 弧形突出部分的最佳坡度范围为 30% ~ 70%, 具体数值通过后续仿真确定。根据功能设计, 第 1 弧形突出部分的作用是预清种, 因此在清种时需要避免过度清种。根据前期试验结果, 第 1 弧形突出部分的最佳坡度范围为第 2 弧形突出部分坡度的 60% ~ 80%。在本设计中, 将第 1 弧形突出部分的坡度 I_1 设置为第 2 弧形突出部分坡度 I_2 的 70%。同时, 第 3 弧形突出部分设计为对第 2 弧形突出部分清种工作的补充, 其设计参数 I_3 与第 2 弧形突出部分相同。这样的设计方案在试验中表现出了较好的效果, 并得到了验证。

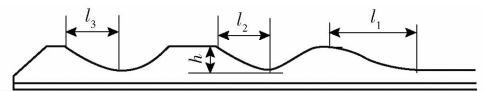


图 10 中间扰动板结构示意图

Fig. 10 Structure diagram of middle disturbance

两侧扰动板弧形突出部分坡度 I' 与中间扰动板相同。两侧扰动板弧形突出部分垂直高度 h' 为中间扰动板弧形突出部分垂直高度 h 与扰动板凹槽长度差 C 之和, 其水平距离 l' 通过式 (8) 确定。

2.3.3 多重扰动装置安装位置设计

多重扰动装置通过调整取种勺凹槽顶端的距离来改变取种勺容种空间, 以适应不同级别的蒜种尺寸差异, 从而达到最佳的单粒取种效果。

对于Ⅰ级蒜种,最佳的安装位置是将多重扰动装置安装后容种空间只容纳1粒Ⅰ级蒜种。根据2.2.2节可知,多重扰动装置与取种勺凹槽顶端的距离为0 mm。

对于Ⅱ级蒜种,多重扰动装置安装后容种空间 S_3 应能够完全容纳1粒Ⅱ级蒜种,即 S_3 应大于Ⅱ级蒜种的最大厚度 T_{2max} 。同时为避免重种问题, S_3 应小于Ⅱ级蒜种的最小厚度 T_{2min} 的2倍。具体的限制条件为

$$T_{2max} < S_3 < 2T_{2min}$$

(9)

在本设计中 S_3 取范围内的中间值28.3 mm,综合以上原则,Ⅱ级蒜种的多重扰动装置与取种勺凹槽顶端的距离为 S_3 与 S_2 之间的差值,即6.1 mm。

针对Ⅲ级蒜种,多重扰动装置安装后容种空间 S_4 应能够完全容纳1粒Ⅲ级蒜种,即 S_4 应大于Ⅲ级蒜种的最大厚度 T_{3max} 。为避免重种问题, S_4 应小于Ⅲ级蒜种的最小厚度 T_{3min} 的2倍。具体的限制条件为

$$T_{3max} < S_4 < 2T_{3min}$$

(10)

在本设计中 S_4 取范围内的中间值34.3 mm,基于以上原则,Ⅲ级蒜种的多重扰动装置与取种勺凹槽顶端的距离为 S_4 与 S_2 之间的差值,即12.1 mm。

3 DEM-MBD 仿真模型建立

3.1 颗粒模型与取种模型建立

通过EDEM-RecurDyn耦合仿真试验来确定最佳的排种器参数。为减少仿真时间,将取种模型简化为种箱、多重扰动装置、链轮和取种勺3部分。以山东省金乡县3个级别的蒜种为研究对象,在Solidworks软件中建立了3级蒜种的模型,并将其另存为step格式文件,导入RecurDyn中,对其进行材料条件的设定和空间位置调节,将空间位置设置好的模型保存为wall文件导入到EDEM中,观察其空间位置。使用单个球状颗粒来填充蒜种模型,如图11所示。

3.2 仿真参数

基于蒜种之间无显著的相互粘附作用,在仿真试验中采用Hertz-Mindlin(无粘滑)模型作为接触模型。排种器的材料统一设置为45号钢。蒜种和排种器的仿真参数以及接触模型参数^[22-23]如表2、3所示。

为了模拟真实情况,采用颗粒工厂并使用Random分布随机生成蒜种。生成的蒜种数量为300粒,设定蒜种的鳞芽朝向为随机,其大小按照构建蒜种模型的0.92~1.07倍的分布系数进行调整。

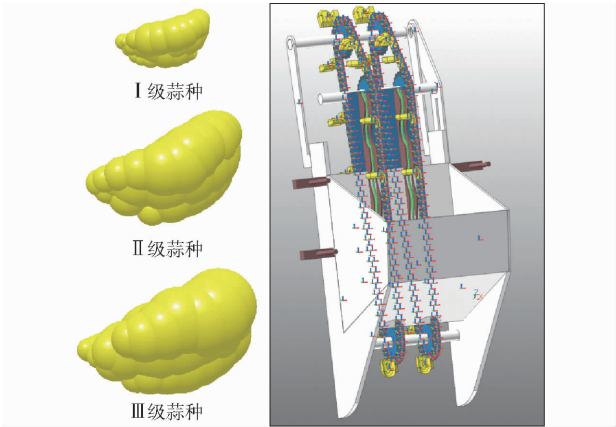


图 11 蒜种模型和排种器模型

Fig. 11 Garlic model and seeder model

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数	蒜种	45 号钢
密度/(kg·m ⁻³)	1 080	7 800
泊松比	0.23	0.25
弹性模量/MPa	23.82	68 935.24

表 3 接触模型参数

Tab. 3 Contact model parameters

接触形式	碰撞恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
蒜种-蒜种	0.492	0.385	0.102
蒜种-45 号钢	0.432	0.466	0.214

根据GB/Z 26578—2011《大蒜生产技术规范》,在平畦种植时,株距 s 应控制在80~100 mm范围内,种勺线速度则应在0.06~0.14 m/s范围内^[24]。根据实际工作需求^[22],取种勺线速度应在0.04~0.09 m/s范围内。取种勺间隔距离 d 计算公式为

$$d = MP = \frac{v_1}{vs}$$

(11)

式中 M ——2个取种勺间隔的链节个数

P ——链条节距,mm

v_1 ——取种勺线速度,m/s

v ——种勺线速度,m/s

种植株距 s 、种勺线速度及取种勺线速度均设置为中间值,计算可得取种勺间隔距离 d 为58.5 mm,而根据GB/T 1243—2006《传动用短节距精密滚子链、套筒链、附件和链轮》的规定,选择06B-1型链条,其节距为9.5 mm,取种勺间隔的链节个数为6个。

4 仿真分析

4.1 取种过程

4.1.1 种箱倾斜角对充种性能的影响

根据前文的分析和前期试验结果可知,种箱的

倾斜角对两个种勺之间的空间结构、种群回填流动方向以及蒜种回填数量产生影响,进而会对取种勺的充种性能产生影响。为了确定最佳试验参数,进行了仿真试验。如图 12 所示,试验选择 5 种不同倾斜角:0°、7.5°、15°、22.5°和 30°,并分别设置取种勺速度为 0.04、0.07、0.09 m/s。针对 3 级蒜种进行仿真试验,以充入蒜种 1 粒及以上为充种成功的标准进行评估。具体的试验结果如表 4 所示。

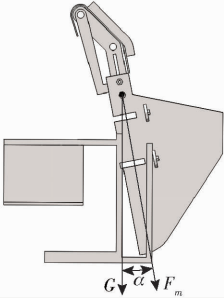


图 12 种箱倾斜角示意图

Fig. 12 Illustration of tilt angle of seed box

表 4 不同倾斜角时充种成功率

Tab. 4 Results of seed filling success rate of different tilt angles

蒜种 级别	速度 v_1 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	倾斜角 $\alpha / (^\circ)$					%
		0	7.5	15	22.5	30	
I	0.04	96	98	99	97	95	
	0.07	96	96	100	98	96	
	0.09	93	97	98	97	91	
II	0.04	92	95	99	97	93	
	0.07	93	97	100	97	91	
	0.09	91	95	97	95	88	
III	0.04	88	96	96	94	87	
	0.07	90	93	97	93	88	
	0.09	88	90	95	90	85	

当蒜种完全脱离种群时,对蒜种进行受力分析。假设蒜种质量 M 为 0.006 kg。根据不同倾斜角的情况进行如下分析:

(1) 倾斜角为 0°时,取种勺对蒜种的支持力为 $F_{N1} = 0.06 \text{ N}$ 。蒜种仅受到取种勺支持力 F_{N1} 和重力 G 的作用,由于缺乏其他支持力,蒜种的充种成功率

较低。

(2) 倾斜角为 15°时,取种勺对蒜种的支持力为 $F_{N1} = 0.058 \text{ N}$,种箱内壁对蒜种的支持力为 $F_{N2} = 0.015 \text{ N}$ 。此时种箱内壁的支持力作为辅助力增加,使得蒜种更加稳定,同时两个种勺之间的空间结构和种群回填流动方向也发生了变化。该情况下,蒜种的充种成功率增加。

(3) 倾斜角为 30°时,取种勺对蒜种的支持力为 $F_{N1} = 0.052 \text{ N}$,种箱内壁对蒜种的支持力为 $F_{N2} = 0.03 \text{ N}$ 。该情况下,种箱内壁的支持力增大,而取种勺的支持力减少,导致蒜种更容易从两侧滑落,充种效果不理想。

根据仿真结果可知,在不同级别的蒜种和不同速度的情况下,倾斜角约为 15°时,蒜种充种效果最佳。

4.1.2 种勺线速度对充种性能的影响

设置倾斜角为 15°,取种勺线速度分别为 0.04、0.07、0.09 m/s,进行仿真试验。图 13 为 EDEM 软件矢量模式,显示了蒜种运动速度矢量。

当取种勺线速度为 0.04 m/s 时(图 13a),种群蒜种的填充速度快于取种勺内蒜种的速度,取种勺的充种效果较好。然而,在清种阶段,取种勺速度较慢,蒜种的平衡难以被破坏,容易出现重种现象。当取种勺线速度为 0.07 m/s 时(图 13b),种群蒜种的填充速度仍快于取种勺内蒜种的速度,充种效果较好。当取种勺线速度为 0.09 m/s 时(图 13c),种群蒜种的填充速度慢于取种勺内蒜种的速度,影响了下一次取种勺的充种效果。在清种阶段,取种勺速度较快,容易造成漏种现象。

综上所述,根据仿真结果,在倾斜角为 15°的情况下,取种勺线速度为 0.07 m/s 时表现出较好的充种效果。这些观察结果可以帮助优化取种勺的设计和操作参数,以提高充种效率并减少重种和漏种问题。

4.2 排种器清种过程仿真试验与分析

4.2.1 取种勺凹槽仿真试验

将倾斜角设置为 15°,取种勺线速度设置为

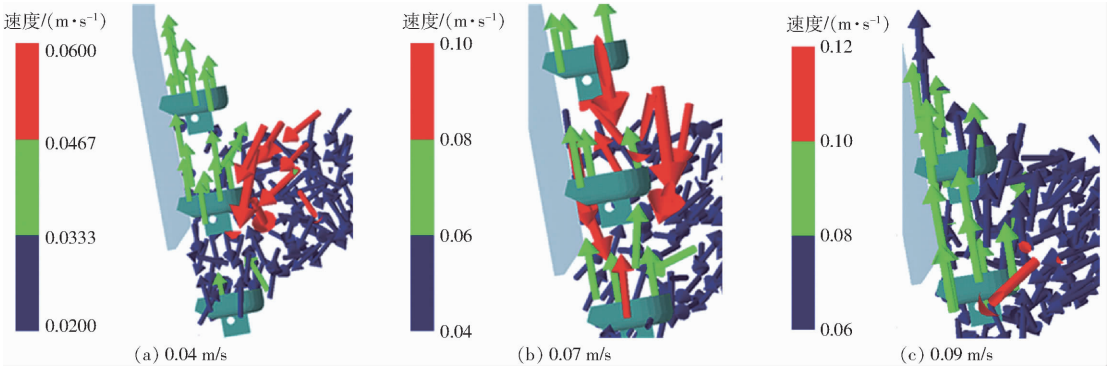


图 13 充种过程速度矢量图

Fig. 13 Velocity vector diagrams of seed filling process

0.07 m/s,第 2 弧形突出部分坡度设置为 50%。根据公式(5)的限制条件,在凹槽宽度 A 、凹槽间隔 B 的取值范围内,选择 11 种方案作为变限位取种勺凹槽的设计方案。依照方案进行建模并导入 EDEM-RecurDyn 进行耦合仿真试验,结果如表 5 所示。

表 5 取种勺各凹槽参数组合方案单粒取种成功率

Tab.5 Single-seed sowing success rate for each groove configuration of sowing spoon %

凹槽间隔 B / mm	凹槽宽度 A /mm				
	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
2.5	77	87	89	86	81
3.5	88	95	95		
4.5	85	98			
5.5	75				

由仿真结果可以看出,当 $A=3\text{ mm}$ 、 $B=4.5\text{ mm}$ 时,单粒取种率最高,由式(5)计算可得凹槽长度差 $C=2.7\text{ mm}$ 、侧壁宽度 $V=2\text{ mm}$ 。

4.2.2 多因素仿真试验

以中间多重扰动板第 2 弧形突出部分坡度(简称为坡度) x_1 、倾斜角 x_2 、取种勺线速度 x_3 为试验因素,采用 Box-Behnken 试验设计方法^[25-27],进行多因素性能试验,试验因素和编码如表 6 所示,由于装置控制精度限制,取种勺线速度零水平值由 0.065 m/s 简化为 0.07 m/s。

表 6 试验因素与编码
Tab.6 Test factors and codes

编码	因素		
	坡度 $x_1/\%$	倾斜角 $x_2/(\text{ }^\circ)$	取种勺线速度 $x_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
-1	30	0	0.04
0	50	15	0.07
1	70	30	0.09

3 级蒜种按照单因素试验的结果,选择最佳多重扰动装置安装位置进行试验。每次试验进行 200 次取种,对勺内蒜种进行统计,并计算平均值。评价指标计算式为

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{n}{m} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{o}{m} \times 100\% \end{cases} \quad (12)$$

式中 Y_1 ——单粒取种率,% Y_2 ——漏种率,%
 m ——试验总次数
 n ——清种完成后取种勺内单粒蒜种次数
 o ——清种完成后取种勺内无蒜种次数

4.2.2.1 回归模型建立与显著性检验

依照勺链式大蒜播种机的田间作业要求,将单

粒取种成功率 Y_1 与漏种率 Y_2 作为响应值, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值,试验方案和结果如表 7 所示。

表 7 试验方案与结果
Tab.7 Test scheme and results

序号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	0	0	0	98.5	0.5
2	-1	1	0	95.5	2.0
3	0	0	0	99.0	0.5
4	0	0	0	96.5	0.5
5	0	0	0	99.0	0
6	1	1	0	86.5	4.0
7	1	0	-1	85.5	4.5
8	-1	0	-1	93.5	2.0
9	0	0	0	97.0	1.5
10	1	-1	0	94.5	3.0
11	0	-1	1	94.5	2.0
12	0	1	1	90.5	5.5
13	-1	-1	0	94.0	2.5
14	0	1	-1	94.0	1.5
15	1	0	1	93.0	4.0
16	-1	0	1	95.5	2.0
17	0	-1	-1	88.5	3.5

利用 Design-Expert 软件对表 7 的数据进行多元线性回归拟合及方差分析,结果如表 8 所示。建立单粒取种率 Y_1 、漏种率 Y_2 与 X_1 、 X_2 、 X_3 的二次多项式回归模型。对单粒取种率 Y_1 分析可知,在 $P<0.05$ 水平上, X_1 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 影响显著,其余不显著;对漏种率 Y_2 分析可知,在 $P<0.05$ 水平上, X_1 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 影响显著,其余不显著。两模型 $P<0.01$,说明单粒取种率 Y_1 与漏种率 Y_2 作为响应函数的回归模型显著,失拟项 $P>0.05$,失拟不显著,回归模型具有高度拟合性,回归方程为

$$\begin{aligned} Y_1 = & 98 - 2.37X_1 - 0.63X_2 + 1.5X_3 - \\ & 2.38X_1X_2 + 1.38X_1X_3 - 2.37X_2X_3 - \\ & 2.69X_1^2 - 2.69X_2^2 - 3.44X_3^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Y_2 = & 0.6 + 0.88X_1 + 0.25X_2 + 0.25X_3 + \\ & 2.38X_1X_2 - 0.125X_1X_3 + 1.38X_2X_3 + \\ & 1.14X_1^2 + 1.14X_2^2 + 1.39X_3^2 \end{aligned} \quad (14)$$

4.2.2.2 响应面分析

利用 Box-Behnken Design 进行试验数据分析,通过分析各项系数,确定各因素对单粒取种率 Y_1 、漏种率 Y_2 的影响,各因素交互作用的响应面如图 14 所示。因交互项对漏种率的影响均不显著,不做响应面分析。

由图 14a 及统计数据可知,在取种勺线速度和倾斜角保持不变的情况下,当坡度在 30%~50% 范围内时,单粒取种率增加,漏种率降低,且降低幅度

表 8 方差分析
Tab.8 Variance analysis

指标	变异来源	平方和	自由度	F	P
单粒取种率	模型	242.26	9	26.92	<0.01 **
	X_1	45.12	1	45.12	<0.01 **
	X_2	3.12	1	3.12	0.33
	X_3	18.00	1	18.00	0.04 *
	X_1X_2	22.56	1	22.56	0.03 *
	X_1X_3	7.56	1	7.56	0.15
	X_2X_3	22.56	1	22.56	0.03 *
	X_1^2	30.41	1	30.41	0.01 *
	X_2^2	30.41	1	30.41	0.01 *
	X_3^2	49.75	1	49.75	<0.01 **
	残差	20.12	7		
	失拟项	14.62	3	3.55	0.1265
	误差	5.50	4		
漏种率	总和	262.38	16		
	模型	36.52	9	9.63	<0.01 **
	X_1	6.12	1	14.53	<0.01 **
	X_2	0.500 0	1	1.19	0.31
	X_3	0.500 0	1	1.19	0.31
	X_1X_2	0.562 5	1	1.33	0.29
	X_1X_3	0.062 5	1	0.5	0.71
	X_2X_3	7.56	1	17.94	0.31
	X_1^2	5.45	1	12.93	<0.01 **
	X_2^2	5.45	1	12.93	<0.01 **
	X_3^2	8.11	1	19.23	<0.01 **
	残差	2.95	7		
	失拟项	1.75	3	1.94	0.2643
	误差	1.20	4		
	总和	39.47	16		

注：* 表示差异显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)；** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

不大。然而,当坡度达到 50% ~ 70% 时,单粒取种率降低,漏种率增加,且增加幅度较大。在取种勺线速度和坡度保持不变的情况下,当倾斜角在 0° ~ 15° 范围内时,单粒取种率增加,漏种率降低,且幅度较大。然而,当倾斜角达到 15° ~ 30° 时,单粒取种率降低,漏种率增加,且幅度较小。

图 14b 结果显示,在坡度与倾斜角一定的情况下,当取种勺线速度为 0.04 ~ 0.07 m/s 时,单粒取种率增加,漏种率降低且降低幅度不大。然而,当取种勺线速度为 0.07 ~ 0.09 m/s 时,单粒取种率降低,漏种率增加且增加幅度较大。

4.2.2.3 参数优化

使用 Design-Expert 中的 optimization 功能,以单粒取种率最大为评价指标。优化函数与约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

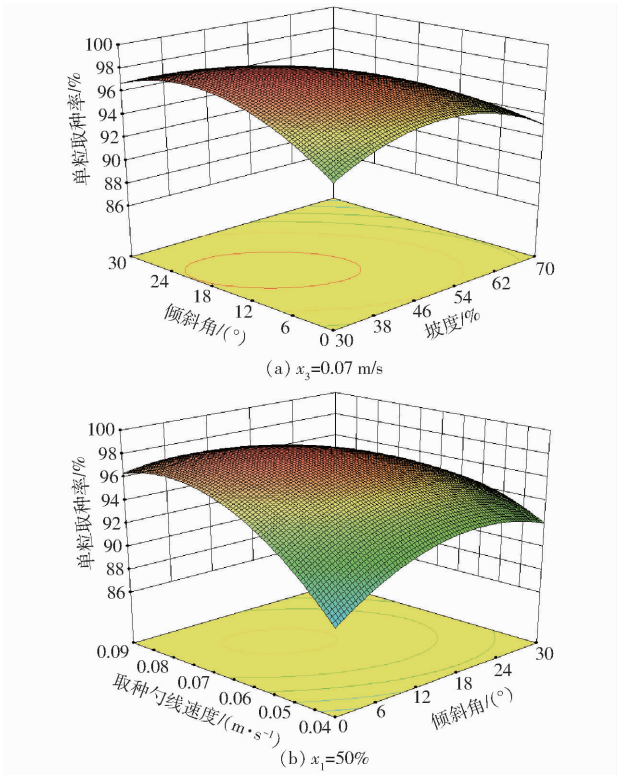


图 14 各因素交互作用的响应曲面
Fig.14 Response surfaces of interaction of various factors

由式(15)得出中间多重扰动板第 2 弧形突出部分最佳坡度为 41.8%,最佳倾斜角为 15°,最佳取种勺线速度为 0.07 m/s,此时,单粒取种率为 98.5%,漏种率为 0.4%。

5 台架试验

5.1 试验过程

为验证多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器的单粒取种率与仿真结果的一致性,评估实际作业效果,在山东农业大学机械与电子工程学院实验室进行了取种试验。试验对象为 I 级蒜种、II 级蒜种和 III 级蒜种,各 300 粒,根据当前试验的蒜种级别,调节多重扰动装置至最佳安装位置。分别以种勺线速度、倾斜角为试验变量,进行单因素试验。

试验台采用电机驱动种勺运动,种勺线速度可调。试验过程中,首先将蒜种放置在倾斜角为 15° 的试验台上,然后分别设置取种勺线速度为 0.04、0.07、0.09 m/s。每个速度下进行 5 次试验,每次试验重复 200 次取种操作。成功率的计算方式为成功取出单粒蒜种的次数除以总次数。试验台和试验过程如图 15 所示,试验结果如图 16 所示。

将取种勺线速度设置为 0.07 m/s,然后分别设置倾斜角为 11°、13°、15°、17°、19°。每个倾斜角下进行 5 次试验,每次试验重复 200 次取种操作。试验结果如图 17 所示。

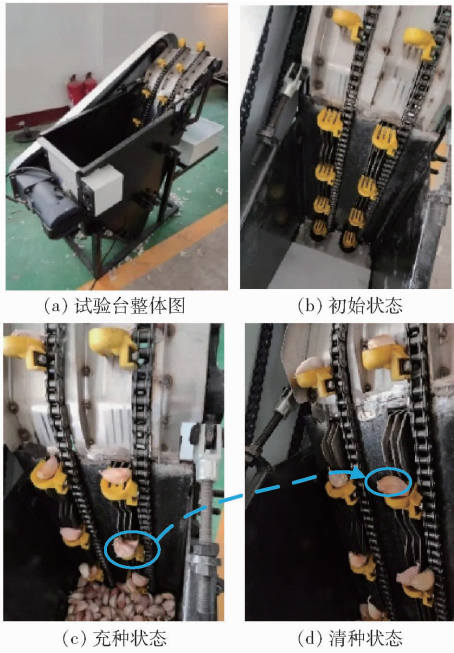


图 15 试验台与试验过程图

Fig. 15 Test bench and test process diagrams

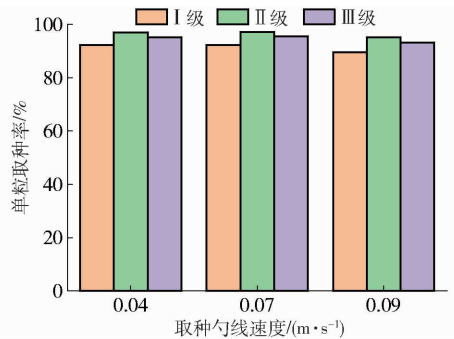


图 16 不同速度下的单粒取种成功率

Fig. 16 Success rate of single-seed collection at different speeds

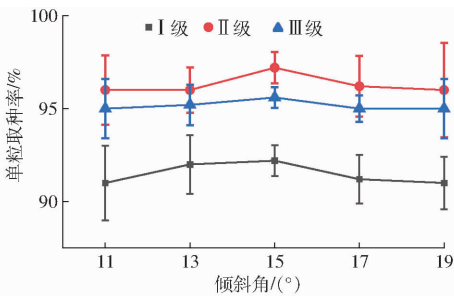


图 17 不同倾斜角下的单粒取种成功率

Fig. 17 Success rate of single-seed collection at different angles of tilt

5.2 试验结果分析

由图 16 可知,在倾斜角固定的情况下,3 级蒜种均在取种勺线速度为 0.07 m/s 时取得了最好的单粒取种率,试验结果与仿真结果一致。此外,试验结果表明,该装置针对 II 级、III 级蒜种的取种效果较为理想,单粒取种率均高于 95%。然而,对于 I 级蒜种的单粒取种率较低,表现不如预期。主要原因

是 I 级蒜种多为小型蒜种,生长过程中遭受挤压,形状不规则且个体之间差异较大。实际播种过程中,该类蒜种由于营养物质较少,后期植株生长状况不佳,一般不作为种植蒜种使用。

由图 17 可知,在取种勺线速度固定的情况下,3 级蒜种均在种勺倾斜角为 15°时取得了最好的单粒取种率,试验结果与仿真结果一致。其中 II 级、III 级蒜种在倾斜角为 15°时单粒取种率分别达到 97.2%、95.6%,相关指标满足大蒜播种要求。

在取种勺线速度为 0.07 m/s、倾斜角为 15°的最佳试验条件下,试验结果为: I 级蒜种单粒取种率为 92.2%, II 级蒜种单粒取种率为 97.2%, III 级蒜种单粒取种率为 95.6%,漏种率均低于 3%。试验结果与仿真结果基本一致,最佳参数可靠,该装置单粒取种率高、漏种率低,能够满足大蒜取种的相关农艺要求。

6 结论

(1) 针对勺链式大蒜取种装置存在的重种和漏种问题,设计了一种多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器。该装置在充种阶段获取多粒蒜种,经多重扰动清种,最终取种勺内仅余 1 粒蒜种。经试验验证,该排种器能够有效提高大蒜单粒取种率,同时降低漏种率。

(2) 基于蒜种形态学结构及相关统计数据,通过理论分析确定了取种勺最佳长度、宽度和深度分别为 51、22.7、12.9 mm。此外,还确定了取种勺凹槽、多重扰动装置的关键参数范围及各级蒜种的多重扰动装置与取种勺凹槽顶端的最佳距离。对于 I 级蒜种,最佳距离为 0 mm, II 级蒜种为 6.1 mm, III 级蒜种为 12.1 mm。

(3) 使用 EDEM - RecurDyn 软件进行耦合仿真试验,通过单因素仿真试验确定了充种时的最佳取种勺线速度为 0.07 m/s,最佳倾斜角为 15°,清种时最佳取种勺凹槽宽度 3 mm,凹槽间隔 4.5 mm,凹槽长度差 2.7 mm。进行三因素三水平正交试验,通过 Design-Expert 软件和多因素仿真试验,确定了中间多重扰动板的第 2 弧形突出部分最佳坡度为 41.8%。此外,试验还确定了在清种过程中的最佳取种勺线速度和最佳倾斜角,分别为 0.07 m/s 和 15°。

(4) 通过试验台对仿真结果进行验证并测试作业效果,在取种勺线速度为 0.07 m/s、倾斜角为 15°的最佳试验条件下, I 级蒜种单粒取种率为 92.2%, II 级蒜种单粒取种率为 97.2%, III 级蒜种单粒取种率为 95.6%,漏种率均低于 3%。试验结果与仿真结果基本一致,最佳参数可靠,该装置单粒取种率高、漏种率低,满足大蒜取种的相关农艺要求。

参 考 文 献

[1] 杨宾宾,宗义湘,赵邦宏. 中国大蒜产业国际竞争力测算及影响因素分析[J]. 农业展望,2019,15(10):113-117,126.
YANG Binbin,ZONG Yixiang,ZHAO Banghong. Measurement of the international competitiveness of China's garlic industry and its influencing factors[J]. Agricultural Outlook,2019,15(10): 113-117,126. (in Chinese)

[2] 张义. 大蒜机械化种植现状及发展措施探讨[J]. 中国果菜,2020,40(4):81-83,87.
ZHANG Yi. Current situation and development measures of garlic mechanized planting[J]. China Fruit Vegetable,2020,40(4): 81-83,87. (in Chinese)

[3] 吴小伟,武文娟,钟志堂,等. 大蒜机械化播种技术研究现状与问题分析[J]. 中国蔬菜,2021(3):9-16.
WU Xiaowei,WU Wenjuan,ZHONG Zhitang,et al. Research status and problem analysis of garlic mechanized sowing technology[J]. China Vegetables,2021(3):9-16. (in Chinese)

[4] 刘甲振,耿爱军,栗晓宇,等. 大蒜播种机单粒取种及补种技术研究现状[J]. 农机化研究,2019,41(2):262-268.
LIU Jiazhen,GENG Aijun,LI Xiaoyu,et al. Research status of garlic planting machine single seed-filling and resow[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2019,41(2): 262-268. (in Chinese)

[5] 崔荣江,黄嘉宝,张振河,等. 大蒜机械化播种技术研究现状[J]. 农业装备与车辆工程,2018,56(6):54-56.
CUI Rongjiang,HUANG Jiabao,ZHANG Zhenhe,et al. Research status of garlic mechanized sowing technology[J]. Transactions of the Agricultural Equipment and Vehicle Engineering,2018,56(6): 54-56. (in Chinese)

[6] ZHANG Dengquan,WU Yanjuan,ZHANG Chuangkai. Vertical planting structure design for planter[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,654: 87-90.

[7] 谢东波,张春岭,吴晓庆,等. 抗种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):47-57.
XIE Dongbo,ZHANG Chunling,WU Xiaoqing,et al. Design and test of garlic seed placer with seed disturbing tooth assisted air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):47-57. (in Chinese)

[8] 栗晓宇,耿爱军,侯加林,等. 全自动蒜种盒提取投放装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(23):32-37.
LI Xiaoyu,GENG Aijun,HOU Jialin,et al. Design and experiment of full-automatic lifting and releasing device of garlic seed box[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(23): 32-37. (in Chinese)

[9] 耿爱军,张兆磊,宋占华,等. 蒜种盒机械投放过程运动学分析与参数优化试验[J]. 农业工程学报,2016,32(5):29-35.
GENG Aijun,ZHANG Zhaolei,SONG Zhanhua,et al. Kinematic analysis and parameter optimized experiment of garlic box putting process[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(5): 29-35. (in Chinese)

[10] 张春岭,吴晓庆,谢东波,等. 电液混合调控式大蒜播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):166-174.
ZHANG Chunling,WU Xiaoqing,XIE Dongbo,et al. Design and experiment of electro-hydraulic mixed garlic planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10): 166-174. (in Chinese)

[11] YANG W S,CHO D L. Seeding machine with a reduced breakage rate of seed,which is proper for seeding an angulated seed such as a garlic seed:KR1020060028193[P]. 2006-03-29.

[12] BAKHTIARI M R,LOTHAVI M. Development and evaluation of an innovative garlic clove precision planter[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2009,11(2):125-136.

[13] 李玉华,张智龙,李天华,等. 轮勺式大蒜单粒取种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(3):61-68.
LI Yuhua,ZHANG Zhilong,LI Tianhua,et al. Design and experiment of wheel-spoon type garlic precision seed-picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(3):61-68. (in Chinese)

[14] 侯加林,刘全程,李天华,等. 双充种室大蒜单粒取种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(14):21-32.
HOU Jialin,LIU Quancheng,LI Tianhua,et al. Design and experiment of the garlic seed metering device with double seed-filling chambers[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(14): 21-32. (in Chinese)

[15] 李天华,张海阔,韩相龙,等. 勺链式大蒜播种机漏取种检测与补种装置设计及试验[J]. 农业工程学报,2022,38(4):24-32.
LI Tianhua,ZHANG Haikuo,HAN Xianglong,et al. Design and experiment of missing seed detection and the reseeding device for spoon chain garlic seeders[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(4): 24-32. (in Chinese)

[16] 孙伟,王关平,吴建民. 勺链式马铃薯排种器漏播检测与补种系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(11):8-15.
SUN Wei,WANG Guanping,WU Jianmin. Design and experiment on loss sowing testing and compensation system of spoon-chain potato metering device[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(11): 8-15. (in Chinese)

[17] 苏微,洪方伟,赖庆辉,等. 预切种甘蔗勺链式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):87-97.
SU Wei,HONG Fangwei,LAI Qinghui,et al. Design and test of pre-cutting and spoon seed-metering device for sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10): 87-97. (in Chinese)

[18] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等. 基于 DEM-MBD 耦合的链勺式人参精密排种器研究[J]. 农业机械学报,2022,53(3):91-104.
LAI Qinghui,JIA Guangxin,SU Wei,et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):91-104. (in Chinese)

[22] 王鹏新, 齐璇, 李俐, 等. 基于随机森林回归的玉米单产估测[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 237 – 245.
WANG Pengxin, QI Xuan, LI Li, et al. Estimation of maize yield based on random forest regression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 237 – 245. (in Chinese)

[23] 刘峻明, 周舟, 和晓彤, 等. 基于 NDWI 和卷积神经网络的冬小麦产量估测方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 273 – 280.
LIU Junming, ZHOU Zhou, HE Xiaotong, et al. Winter wheat yield estimation method based on NDWI and convolutional neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 273 – 280. (in Chinese)

[24] 孙威, 王鹏新, 韩丽娟, 等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 22 – 26.
SUN Wei, WANG Pengxin, HAN Lijuan, et al. Further improvement of the approach to monitoring drought using vegetation and temperature condition indexes from multi-years remotely sensed data[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 22 – 26. (in Chinese)

[25] 王鹏新, 荀兰, 李俐, 等. 基于时间序列叶面积指数傅里叶变换的作物种植区域提取[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 207 – 215.
WANG Pengxin, XUN Lan, LI Li, et al. Crop cultivation an extraction of planting areas of main crops based on Fourier transformed characteristics of time series leaf area index products[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 207 – 215. (in Chinese)

[26] MA Y C, ZHANG Z, KANG Y H, et al. Corn yield prediction and uncertainty analysis based on remotely sensed variables using a Bayesian neural network approach[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 259: 112408.

[27] TIAN H R, WANG P X, TANSEY K, et al. A deep learning framework under attention mechanism for wheat yield estimation using remotely sensed indices in the Guanzhong Plain, PR China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102: 102375.

[28] GEVREY M, DIMOPOULOS I, LEK S. Review and comparison of methods to study the contribution of variables in artificial neural network models[J]. Ecological Modelling, 2003, 160(3): 249 – 264.

[29] 张悦, 王鹏新, 陈弛, 等. 基于双变量同化和交叉小波变换的冬小麦单产估测[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 170 – 179.
ZHANG Yue, WANG Pengxin, CHEN Chi, et al. Estimation of winter wheat yield based on bivariate assimilation and cross-wavelet transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 170 – 179. (in Chinese)

(上接第 75 页)

[19] 牛康, 周利明, 苑严伟, 等. 勺链式马铃薯排种器自补种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 76 – 83.
NIU Kang, ZHOU Liming, YUAN Yanwei, et al. Design and experiment on automatic compensation system of spoon-chain potato metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 76 – 83. (in Chinese)

[20] 徐陶. 大蒜种子机械物理特性及其测试方法的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2017.
XU Tao. Study on mechanical properties and testing methods of garlic seeds[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2007. (in Chinese)

[21] 张波屏. 现代种植机械工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

[22] 侯加林, 王后新, 牛子儒, 等. 大蒜取种装置取种清种性能离散元模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 48 – 57.
HOU Jialin, WANG Houxin, NIU Ziru, et al. Discrete element simulation and experiment of picking and clearing performance of garlic seed-picking device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 48 – 57. (in Chinese)

[23] 侯加林, 黄圣海, 牛子儒, 等. 双鸭嘴式大蒜正头装置调头机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 87 – 96.
HOU Jialin, HUANG Shenghai, NIU Ziru, et al. Mechanism analysis and test of adjusting garlics upwards using two duckbill devices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 87 – 96. (in Chinese)

[24] 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)

[25] 侯加林, 方立志, 李玉华, 等. 基于电容检测技术的蒜种鳞芽扶正装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 63 – 72.
HOU Jialin, FANG Lizhi, LI Yuhua, et al. Design and test of garlic clove orientation device based on capacitive detection technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 63 – 72. (in Chinese)

[26] LAI Q H, SUN K, YU Q, et al. Design and experiment of a six-row air-blowing centralized precision seed-metering device for *Panax notoginseng*[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2): 111 – 122.

[27] 侯加林, 李超, 娄伟, 等. 大蒜联合收获机浮动式夹持装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 137 – 145.
HOU Jialin, LI Chao, LOU Wei, et al. Design and test of floating clamping device for garlic combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 137 – 145. (in Chinese)